

**MOOTTORIN VALINTA  
ULTRAKEVYEEN  
LENTOKONEESEEN JA MOOTTORIPUKIN LUJUUSTAR-  
KASTELU**

Minisytken rakennusprojekti

Juusola Sami

Opinnäytetyö  
Tekniikan ja liikenteen ala  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Insinööri AMK

2016

Tekniikka ja Liikenne  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Insinööri AMK

---

<b>Tekijä</b>	Sami Juusola	<b>Vuosi</b>	2016
<b>Ohjaaja</b>	TkL Lauri Kantola		
<b>Työn nimi</b>	Moottorin valinta ultrakevyeen lentokoneeseen ja moottoripukin lujuustarkastelu		
<b>Sivu- ja liitemäärä</b>	43 + 3		

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli valita sopiva moottori Minisytty-lentokoneeseen sekä tehdä lujuustarkastelu lentokoneen moottoripukille.

Lujuustarkastelu tehtiin olemassa olevaan ja pidennettyyn moottoripukkiin. Opinnäytetyön tarkoituksena oli myös oppia tekemään FEM-lujuusanalyysyjä Inventor 3D-mallinnusohjelmalla.

Opinnäytetyössä on tutustuttu myös siihen, miten on mahdollista rakentaa har-rasterakenteinen lentokone Suomessa. Työssä selvitettiin, mitä tähän vaaditaan ja kuka lentokoneen voi rakentaa.

Opinnäytetyön aiheeseen päädyttiin siksi, koska olen kiinnostunut ilmailusta ja omistamaani lentokoneen runkoon tulisi tehdä 7 cm pidempi moottoripukki.

Opinnäytetyöhön liittyi paljon tutkimustyötä moottorin valintaan ja moottoripukin rakenteeseen liittyen. Kun tietoa kerättiin, olivat tärkeässä asemassa lentokoneen suunnittelija ja Minisytty-rakentajat Suomessa.

Työssä tuli esille se, että moottoripukkia on mahdollista pidentää rakenteellisen lujuuden liikaa kärsimättä.

Technology, Communication and Transport  
Mechanical and Production Engineering  
Bachelor of Engineering

---

<b>Author</b>	Sami Juusola	Year	2016
<b>Supervisor(s)</b>	Lauri Kantola Lic.Sc (Tech.)		
<b>Subject of thesis</b>	Engine selection for ultralight aircraft and engine mount strength analysis		
<b>Number of pages</b>	43 + 3		

---

Of this thesis purpose was to select a suitable engine for a Minisytky aircraft, and do a strength analysis of the aircraft engine mount.

Strength analysis was done on the original and longer engine mount. The purpose of this thesis was to learn how to do the FEM-strength analysis by Autodesk Inventor 3D modeling software.

In the thesis it was also familiarized, how it is possible to build an experimental aircraft in Finland. The work investigated what this required and who can build an aircraft.

The topic of the thesis was selected, because I'm interested in aviation and I own a fuselage of the aircraft that should be made a 7 cm longer engine mount.

The thesis pertains a lot of research regarding engine selection and the structure of the engine mount. When the information was collected, important positions had the designer and Minisytky's builders in Finland.

In work is noted that it is possible to make the engine mount longer without losing structural strength too much.

Key words

Minisytky, PIK-26, aircraft, engine mount

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	EXPERIMENTAL LENTOKONEET .....	7
2.1	Harrastelentokoneen rakentaminen .....	8
2.2	Ultrakevyet lentokoneet .....	9
3	PIK-26 MINISYTKY-PROJEKTI.....	11
4	SUUNNITTELUA JA RAKENTAMISTA KOSKEVAT MÄÄRÄYKSET .....	13
4.1	Ilmailulaki .....	13
4.2	Ilmailumääräykset .....	13
4.3	Lentokelpoisuusmääräykset ja -tiedotteet.....	15
4.4	Suomalaisten UL-koneiden Tarkastuskäsikirja .....	16
5	MOOTTORIN VALINTA.....	20
5.1	Moottorien vertailu .....	21
5.1.1	Mosler MMCB.....	21
5.1.2	Hummel VW-moottori.....	22
5.1.3	SAVOIA S42Aero moottori .....	24
6	MOOTTORIPUKIN LUJUUDEN TARKASTELU .....	25
6.1	Lujuustarkastelu.....	25
6.1.1	Vääntömomentti .....	27
6.1.2	Työntövoima.....	28
6.1.3	Kuormitusmonikerta .....	28
7	FEM-ANALYYSI .....	29
7.1	FEM vs. analyyttinen laskenta .....	30
7.2	Moottoripukin FEM-analyysi.....	30
8	TULOKSET JA YHTEENVETO .....	40
9	POHDINTA .....	41
	LÄHTEET .....	42
	LIITTEET .....	44

## KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

Amfibio	Vesilentokoneen kellukkeissa tai rungossa on sisäänvedettävät renkaat
FEM	Lujuusanalyysi (Finite Element Method)
PIK	Polyteknikkojen ilmailukerho ry
PPL	Yksityislentäjän lupakirja (Personal Pilot License)
SERA	EU:n yhteiset lentosäännöt (Standardised European Rules of the Air)
TRAFI	Liikenteen turvallisuusvirasto (Finnish Transport Safety Agency)
UL	Ultrakevyt (ultralight)
UPL	Ultrakevytlupakirja (Ultralight Pilot License)
MGPL	Moottoripurjelentäjän lupakirja (Motor Glide Personal License)
Ilmailumääräykset:	
GEN	Yleiset määräykset (General)
AGA	Lentopaikat (Aerodromes and Ground Aids)
ANS	Lennonvarmistus (Air Navigation Services)
AIR	Ilma-alukset- ja välineet (Airworthiness)
OPS	Lentotoiminta (Operations)
PEL ja TRG	Lupakirjat ja koulutus (Personnel Licensing ja Training)
SSR	Toisiotutkavastaaja (Secondary Surveillance Radar)
$V_A$	Suunnittelun liikehtimisnopeus

## 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä käsitellään yhtä osa- aluetta lentokoneen rakentamisessa. Työni tavoite on valita omistamaani Minisytky-lentokoneeseen moottori sekä suunnitella muutostyö jo olemassa olevaan moottoripukkiin. Työssä esitetään suunnitelmat ja laskelmat Minisytky-lentokoneen moottorin, potkurin sekä moottoripukin kokoonpanon toimivuutta ajatellen. Työni tarkoitus on oppia myös Inventor-ohjelmaa apuna käyttäen testaamaan moottoripukin toimivuutta koe-kuormittamalla sitä tietokoneavusteisesti FEM-analyysillä. Työn tarkoitus on myös tutustua siihen, kuinka harrasterakenteisen lentokoneen voi rakentaa Suomessa. Käyn työssäni läpi, miten ilmailulaki ja -määräykset koskevat tätä työtä.

Olen itse harrastanut lentämistä noin 9 vuotta, niin moottoripurje- (MGPL), kuin ultrakevyillä (UPL) lentokoneilla. Minisytky kiehtoo minua yksinkertaisuudellaan, se on helppo rakentaa ja huoltaa. Tämän lisäksi oman viehätyksensä tuovat koneen herkkä ohjattavuus ilmassa. Tämä opinnäytetyö antaa hyvät lähtökohdat Minisytky-lentokoneprojektille.

## 2 EXPERIMENTAL LENTOKONEET

Experimental tarkoittaa Suomeksi kokeellista. Voitaisiin sanoa, että varsinaisia experimentalisteja ovat olleet he, jotka ovat ensimmäisinä kokeilleet lentämistä erilaisilla liitokoneilla ja kuumailmapalloilla. Alkuaikoina lentämisen perusasiat ovat olleet tuntemattomia ja joskus harrastajat ovat maksaneet kovimman mahdollisen hinnan kokeiluistaan, menettäneet oman henkensä. Nykypäivän liikennelennot ja ilmailu ovat kuitenkin kaiken lentokokeilemisen tulosta.

Lentokoneet jaetaan tyyppihyväksytyjen ja experimental-luokan lentokoneisiin. Tyyppihyväksytyjä lentokoneita ovat liikennelentokoneet ja pienlentokoneista esimerkiksi Cessna 172. Cessna on hyvin yleinen lentokone harrasteilmailussa. Experimental-lentokoneen, eli harrasterakenteisen lentokoneen, tunnistaa experimental-tekstistä koneen ulkopuolelta ja ohjaamosta.

Käytännössä kaikki lentokoneet ovat aluksi experimental-koneita, jolloin niiden ominaisuuksia kokeilleen testilennoilla. Valmistaja voi hakea lentokoneelle tyyppihyväksyntää, kun on todennut lentokoneen turvalliseksi testien ja koelentojen kautta, sekä lentokoneen tulee täyttää myös tyyppihyväksynnän vaatimukset. Tyyppihyväksyntää vaaditaan ainakin kaupallisessa ilmailussa. Tyyppihyväksytyjä ja harrasterakenteisia koneita koskevat lentokelpoisuusvaatimukset ovat erilaiset.

Experimental-harrastus sisältää lentokoneen suunnittelun, rakentamisen ja lentämisen. Harrastuksen luonteeseen kuuluu oleellisesti koelennot ja lento-ominaisuuksien parantaminen. Siksipä tässä luokassa olevat koneet ovat monesti suorituskykyisempiä ja kiinnostavampia kuin tyyppihyväksytyt koneet tuttuine lento-ominaisuuksineen. Monelle itse rakentaminen on tärkeämpää kuin lentäminen. Koneen ollessa valmis rakentaja tuntee koneen läpikotaisin ja niinpä huolto on helppoa. Kesällä lentokoneen rakentajat kokoontuvat Jämille Jämi Fly In-tapahtumaan esittelemään omia ja katsomaan muiden rakentamia koneita.

Harrasterakenteisia lentokoneita voi huoltaa itse, mutta kone kuitenkin sisältää laitteita joita saa huoltaa vain hyväksytty huolto-organisaatio, kuten korkeusmittarin. Se, että huoltoja voi tehdä itse, vähentää koneen ylläpitokustannuksia. Tyypin hyväksyttyjä koneita saa pääsääntöisesti huoltaa vain sellainen huoltoyrittäjä, joka täyttää alalla vaaditut vaatimukset.

Experimental-luokan koneella lentämiseen tarvitaan koneen tyyppiluokan mukainen lupakirja.

## 2.1 Harrastelentokoneen rakentaminen

Lentokoneen rakentamisen ajaksi tulee nimetä valvoja. Valvoja voi olla lentokonemekaanikko tai aikaisemmin vastaavan koneen rakentanut henkilö. Trafi hyväksyy valvojan projektin vaativuuden perusteella. Koneen ollessa valmis se katsastetaan ”rajoitetun lentokelpoisuustodistuksen” hakemista varten. Todistuksen tullessa voimaan kone on käytettävissä yksityislentotoimintaan tietyin rajoituksin.

Rakennusprojektit kestävät usein monia vuosia. Projektia aloitettaessa onkin hyvä miettiä, kuinka paljon on valmis käyttämään aikaa, missä kone rakennetaan, mitä tekee itse ja mitä teetetään muilla, kuinka suuri on projektin budjetti, mitä ominaisuuksia koneelta halutaan ja millaiseen käyttöön kone on tulossa. Lentokoneharrastuksessa vaaditaan pitkäjänteisyyttä ja tarkkuutta. Lentokoneen rakentaminen on vaativa työ.

Lentokoneen rakentaminen on kiinnostanut minua jo pidemmänkin aikaa. Olen seurannut vuosia eri lentokoneprojektien edistymistä Suomessa, mukaan lukien Minisytky-projekteja. Opinnäytetyötä miettiessäni löysin Minisytkyn rungon, johon päätin alkaa suunnittelemaan voimalaitekokoonpanoa. Tämä opinnäytetyö aloitti myös tämän lentokoneprojektin. Suunnittelutyön jälkeen ei tarvitse kuin toteuttaa lentokoneen rakentaminen loppuun.



## 2.2 Ultrakevyet lentokoneet

Suomessa ultrakevyet lentokoneet kuuluvat myös experimental-luokkaan. Ultrakevyet lentokoneet (UL) erottuvat selvimmin ”oikeista” koneista niiden painon ja suorituskykynsä perusteella.

Ilmailumääräyksen AIR M5-10 mukaisesti kaksipaikkaisen maakoneen maksimipaino on 450 kg ja kaksipaikkaisen vesikoneen tai amfibio:n maksimipaino on 495 kg. Yksipaikkaisilla painot ovat 300 kg ja 330 kg. UL-koneet jaetaan A ja B-luokan koneisiin. A-luokan koneet ovat painopistehjattuja ja B-luokan koneet aerodynaamisesti ohjattuja. Sakkausnopeus laskuasussa on enintään 65 km/h. Laskuasu tarkoittaa, että laskulaipat ja laskutelineet ovat viritetty laskua varten. Kuormattavuuden on oltava vähintään 175 kg kaksipaikkaisilla ja 95 kg yksipaikkaisilla lentokoneilla. (Ilmailumääräys AIR M5-10/2004 2 ja 3.1.)

Nykypäivänä ultralentämisen suosio on kasvanut huimaa vauhtia moottorilentämisen (PPL) määräyksien tiukentuessa ja hintojen jatkuvasti noustessa. Suomessa on paljon järviä ja on hyvin yleistä, että kesällä koneisiin asennetaan kellukkeet tai talvisin sukset, jolloin laskeutumispaikkoja on tarjolla rajattomasti. Monen mielestä ultralentäminen onkin yksi parhaita lentämisen muotoja.

Taulukon 1 mukaan ultrakeveiden lentokoneiden suosio on kasvanut kaikkein eniten vuodesta 2000 alkaen. Vuonna 2014 ultrakeveitä lentokoneita oli ilmailusrekisterin mukaan 318.

Taulukko 1. Suomessa rekisteröidyt ilma-alukset 2000-2008 (Väisänen 2009)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Liikennekoneet	64	72	77	82	82	74	77	88	91
Lentokoneet	570	544	532	519	510	519	522	540	555
Helikopterit ja autogiot	82	81	74	78	76	90	83	79	84
Purje- ja moottoripurjekoneet	372	374	374	378	381	386	390	402	404
Ilmaa kevyemmät ilma-alukset	58	60	63	61	60	61	59	62	64
Ultrakevyet lentokoneet	172	173	173	197	215	221	217	239	274
<b>Yhteensä</b>	<b>1318</b>	<b>1304</b>	<b>1293</b>	<b>1315</b>	<b>1324</b>	<b>1351</b>	<b>1348</b>	<b>1410</b>	<b>1472</b>

Ultra- lentokoneen lentämiseen vaaditaan UPL- lupakirja. Koulutus sisältää 48 h teoriaa ja vähintään 25 lentotuntia. UPL- lupakirja on edullisin tie aloittaa lento-harrastus lentokoneella.

### 3 PIK-26 MINISYTKY-PROJEKTI

PIK-26 Minisytky on diplomi-insinööri Kai Mellénin suunnittelema kannuspyörällä varustettu yksipaikkainen harrasterakenteinen B-luokan ultrakevyt lentokone (Kuva 1). Rakenne on puuta, pois lukien siipi- ja peräsinkaaret (Liite 1). Kaaret on leikattu PVC-vaahtolevystä. Rungon ja siiven runkorakenteina on käytetty mäntyä ja kone on verhoiltu lentokonevanerilla. Voimanlähteeksi on asennettu Mosler CB-40-moottori (Liite 2). Suomessa on rakennettu 6 Minisytkyä ja ulkomailla 8 (Mustonen, 2013). Ensilento on lennetty 10.8.1996.



Kuva 1. PIK-26 Minisytky.

Minisytkyä koskevat seuraavat käyttörajoitukset, kuten muitakin B-luokan ultrakeveitä lentokoneita: vain VFR-lennot on sallittu, taitolento on kielletty ja ansiolentotoiminta on kielletty. Minisytky edellyttää aikaisempaa kannuspyöräkokeusta ja on otettava huomioon, että ohjainvoimat ja -liikkeet ovat erittäin pienet. Puurakenteesta johtuen on suositeltavaa säilyttää konetta sisätiloissa. Lentoko-

neen tekniset tiedot ja suoritusravot esitetään taulukossa 2. Taulukossa olevat tiedot on koottu Kai Mellénin laatimasta lento-ohjekirjasta joka koskee lento-koneyksilöä OH-U355.

Taulukko 2. Minisytken tekniset tiedot ja suoritusravot

SPESIFIKAATIOT Pik- 26 Minisytken			
<b>ULKOMITAT:</b>		<b>VOIMALAITE:</b>	
Siiven kärkiväli	5.24 m	Teho, max	35 hp
Siiven jänne	1.15 m	Staattinen vetovoima	75 kp
Pituus	4.33 m		
Korkeus	1.22 m	<b>POTKURI:</b>	
Korkeusvakaimen kärkiväli	1.61 m		
Pyörien raideväli	1.21 m	Halkaisija	48" (122 cm)
Akseliväli	3.27 m	Nousu	38" (96.5 cm)
<b>PINTA-ALAT:</b>		<b>LASKUTELINE:</b>	
Siipi	6.00 m <sup>2</sup>	Renkaat	LAMB 11.400-5 (6 ply)
Siivekkeet	2 x 0.36 m <sup>2</sup>	Pyörät	5" AZUZA'
Evä	0.24 m <sup>2</sup>	Jarrut	AZUZA, mekaaniset
Sivuperäsin	0.22 m <sup>2</sup>	Kannuspyörä	DARNELL X-15
Korkeusvakain	0.56 m <sup>2</sup>		
Korkeusperäsin	0.38 m <sup>2</sup>	<b>SAAVUTUSARVOT:</b>	
<b>MUITA TIETOJA:</b>		Lähtökiito	170 m
		Ratavaatimus 15 m esteen yli (sileänä)	600 m
Siipiprofiili	GAW-2	Nousunopeus	100-110 km/h
Korkeusvakaajan profiili	NACA 0011	Kohoamisnopeus	3 m/s
Sivuperäsimen profiili	NACA 009	Matkalentonopeus ( 3000 rpm )	160 km/h
Siiven hoikkuus (sivusuhte)	4.56	Suurin nopeus ( 3250 rpm )	180 km/h
Siiven V-kulma	4 °	Polttoaineen kulutus	7-8 l/h
Siiven kierto	0 °	Toiminta-aika	3.25 h
Siiven asetuskulma	1.5 °	Toimintamatka	475 km
Korkeusvakaimen asetuskulma	-3 °	Sakkausnopeus (sileänä)	60 km/h
Moottorin vetosuunta	0 °	Sakkausnopeus(laipoilla)	55 km/h
		Ratavaatimus laskussa 15 m esteen yli	600 m (sileänä)
<b>OHJAINTEEN LIIKKEET (astetta):</b>		Ratavaatimus laskussa 15 m esten yli	500 m (laipoilla)
		Laskukiito sileänä	250 m
Siivekkeet	- 35, + 27		
Siivekkeiden laippa-asento	+ 16	<b>NOPEUSRAJOITUKSET:</b>	
Siivekkeiden liike laippa-asennosta	- 12, +35		
Sivuperäsin	+ 28	Suurin sallittu laippanopeus	120 km/h
Korkeusperäsin	20 ylös, 12 alas	Suurin sallittu liikehtimisnopeus	125 km/h
		Suurin sallittu nopeus	190 km/h
<b>PAINOT:</b>		<b>RAKENTEEN RAJAKUORMAT:</b>	
Tyhjäpaine varusteineen+öljy	135 kg		
polttoaine ( 27 l )	20 kg	Positiivinen kuormitusmonikerroin	3.8 g
Ohjaaja	80 kg	Negatiivinen kuormitusmonikerroin	1.5 g
Matkatavara	5 kg		
Lentoonlähtöpaine, max	240 kg		

## 4 SUUNNITTELUA JA RAKENTAMISTA KOSKEVAT MÄÄRÄYKSET

Experimental-harrastukseen liittyvät anottavat luvat ja oikeudet myönnetään kevyemmällä menettelyllä kuin ansiolentotoiminnan ja yleisilmailun luvat ja oikeudet. Ilmailulakia on noudatettava ensimmäisenä. Ilmailulain jälkeen tulevat ilmailumääräykset (GEN, AGA, ANS, AIR, OPS, PEL, TRG, SEC ja JAR).

Harrasteilma-aluksen suunnitteluun ja rakentamiseen suositellaan käytettäväksi suomalaisten ultrakevyiden lentokoneiden tarkastuskäsikirjaa (Luku 4.5).

### 4.1 Ilmailulaki

Kuten edellisessä luvussa todettiin, ilmailulaki on tärkein ilmailua säätelevä laki, toisena tulevat ilmailumääräykset ja muut tiedotteet.

Ilmailulaki säättää ilma- aluksen rakentamisesta seuraavasti: ”Kun ilma-alusta harrasterakentaja tai voittoa tavoittelematon yhtiö on rakentanut vähintään 51 prosenttia ja ilma-alus tehdään omaan tarkoitukseen eikä kaupalliseen toimintaan, valmistajalta ei vaadita hyväksyntää” (Ilmailulaki 864/2014 42 §).

### 4.2 Ilmailumääräykset

Suomessa toimii liikenteen turvallisuusvirasto Trafi, joka on Suomen ilmailuviranomainen. Trafi huolehtii ilmailun turvallisuudesta ja edistää ympäristön parasta että lentoliikenteen sujuvuutta. Ilmailussa Trafi palvelee ja hoitaa harrasteilmailijan, lentoyhtiön, lentomatkustajan ja lentoaseman pitäjän asioita. Trafian asiantuntijat antavat määräykset lentokoneen rakentamiselle. (Trafi 2015.)

Seuraavissa luvuissa esitetään kaikki projektiani koskevat ilmailumääräykset jotka on otettava huomioon.

Moottorin ei tarvitse olla tyyppihyväksytty, mutta moottorin ja sen asennuksen toimivuuden tulee olla turvallinen. Moottoria on koekäytettävä vähintään 3 h ja sillä on koelennettävä vähintään 45 h ennen rajoitetun lentokelpoisuustodistuksen myöntämistä. Tällä osoitetaan moottorin olevan riittävän luotettava. (Ilmailumääräys AIR M5-1/1996 4.8.)

Tämä määräys tarjoaa siis paljon mahdollisuuksia moottorin valinnalle. Yksi mahdollisuus on esimerkiksi muokata auton moottorista sopiva moottori lentokoneeseen. Se onkin hyvin yleistä.

Potkurin ei tarvitse olla tyyppihyväksytty, jos taataan potkurin luotettava asennus ja toiminta. Potkuria on koekäytettävä maassa vähintään 3 h ja sillä on koelennettävä vähintään 45 h ennen rajoitetun lentokelpoisuuden myöntämistä. Tällä osoitetaan myös potkurin olevan riittävän luotettava. (Ilmailumääräys AIR M5-1/1996 4.9.)

Polttoainejärjestelmän on pystyttävä siirtämään polttoaine moottorille kaikissa suunnitelluissa lentotiloissa. Polttoainejärjestelmän matalista kohdista on pystyttävä poistamaan sinne kertynyt mahdollinen sakka. Järjestelmässä on oltava myös suodatin ennen moottoria. (Ilmailumääräys AIR M5-1/1996 4.10.)

Pakokaasujärjestelmä ei saa aiheuttaa palovaaraa koneen rakenteille tai järjestelmille ja koneessa olijat eivät saa joutua alttiiksi pakokaasuille. (Ilmailumääräys AIR M5-1/1996 4.11.)

Lento-ohjekirjaan on määriteltävä ja ilmoitettava ilma-alusta koskevat käyttö- ja toimintarajoitukset, nämä on käytävä ilmi värimerkinnöin lennon- ja moottorinvalvontamittareissa. Moottorin ja potkurin rajoituksia ei saa ylittää, ne on määriteltävä sen mukaisesti. Lentoonlähtöä ja jatkuvaa käyttöä varten on määriteltävä suurin pyörimisnopeus, alin ja ylin sallittu öljynpaine, jos moottorissa on painevoitelujärjestelmä ja tarvittaessa öljyn ja jäähdytysnesteen suurimmat sallitut lämpötilat. Lento-ohjekirjaan on merkittävä myös aikarajat maksimiarvoille, mi-

käli moottorin valmistaja on ne määrännyt. (Ilmailumääräys AIR M5-1/1996 4.14.)

UL-lentokoneen mittarit täytyy olla käyttötarkoitukseen sopivat, niiden ei tarvitse olla tyyppihyväksytyjä. (Ilmailumääräys AIR M5-10/2004 3.2.)

On määritelty suurin meluraja, joka on 68 dB harrasterakenteiselle UL-lentokoneelle, mitattuna ylilennossa 300 metrin korkeudella suurimmalla jatkuvalla tehoasetuksella. Melunmittaus vaaditaan, jos ei läheisesti vastaavan koneen melunmittauspöytäkirjaa voida pitää vastaavana kyseessä olevalle UL-lentokoneelle. (Ilmailumääräys AIR M5-10/2004 3.6.)

#### 4.3 Lentokelpoisuusmääräykset ja -tiedotteet

Suomessa lentokelpoisuusmääräykset ja -tiedotteet julkaisee Trafi. Ilmailuksen suunnitteluvaltion on kansainvälisen siviili-ilmailun yleissopimuksen 8 liitteen (ICAO Annex 8) mukaan jaettava kaikki se tieto, mikä on lentokelpoisuuden ja lentoturvallisuuden varmistamiseksi välttämätöntä. (Ilmailutiedotus AIR T14-1/2003.)

Esimerkiksi jokin rakenteellinen poikkeama tai vääränlainen osa koneessa, jonka valmistaja on havainnut, on tiedotettava eteenpäin. Vika tiedotetaan Trafille, joka julkaisee lentokelpoisuusmääräyksen. Näin varmistetaan lentoturvallisuus.

Tämä tarkoittaa siis sitä, että kun koneen huoltaja tekee koneelleen huoltoa on hänen tarkistettava, onko hänen huoltamalleen koneelle, moottorille tai potkurille annettu lentokelpoisuusmääräyksiä (Kuva 2). Nämä määräykset on myös hyvä ottaa huomioon rakentamisen aikana. Lentokelpoisuusmääräykset on suoritettava ja kuitattava määräaikaan mennessä, jotta ilma-alus pysyy lentokelpoisena.

Minisytykille ei ole julkaistu lentokelpoisuusmääräyksiä, mutta kuvan 2 mukaiset määräykset koskevat kaikkia UL-lentokoneita ja niin myös Minisytyäkin.

<b><u>Kaikki - Alla</u></b>			
1743	Polttoainejärjestelmän tarkastus	010391	SF
2173	Siivekeohjauksen kytkentä	31121994	SF
2174	Verhoilumateriaalit	31121994	SF
2177	Istuinvyöt	30091994	SF
2866	Koe- ja harrasteilma-alusten istuinvyöt	01072001	SF
3073	Vaijerinkiristimien tarkastus	31122003	SF
3091	Nopeusmittarin merkinnät	01012006	LSG02-003
3102	Ilma-alusten pelastusvarjoista varoittaminen	31032007	
3103	UHS. Ilma-alusten pelastusvarjojen tarkastus	01022007	DULV06-02
3129 -1	Korkeusperäsintrimmi	31102009	
<b>POTKURIT</b>			
<b>Ω</b>			
<b>Kaikki - Alla</b>			
2867	Koe- ja harrasteluokan ilma-alusten potkurit	X	SF

Kuva 2. Kaikkia UL-lentokoneita koskevat lentokelpoisuusmääräykset, vuodelta 2015

#### 4.4 Suomalaisten UL-koneiden Tarkastuskäsikirja

Tarkastuskäsikirjan ovat laatineet Aki Suokas Suomen ilmailuliitto ry:stä ja Markku Hiedanpää Lentoturvallisuushallinnosta 12.6.2003. Käsikirja on laadittu harrastekatsastajille tarkastusohjeeksi Suomessa kaupallisesti rakennettavien ja myytävien UL-koneiden tyyppitarkastuksiin. Tätä ohjetta suositellaan noudattavaksi harrasterakenteisen lentokoneen rakentamisessa ja tarkastuksessa. (Suomalaisten UL-koneiden Tarkastuskäsikirja, 2003.)

Tarkastuskäsikirjassa on mainittu myös samoja asioita, jotka ovat tulleet esille mainitsemisani ilmailumääräyksissä. Käsikirjassa on kuitenkin sellaisia rakennemääräyksiä, jotka täytyy ottaa huomioon Minisyty-projektissa ja opinnäytetyössä. Rakennemääräykset:



*Määräys 301. Rakenteen on kestävä suurimmat käytössä odotettavat kuormat (rajakuormat) ilman pysyviä muodonmuutoksia. Kun rakenteen lujuutta lasketaan, on otettava seuraavat vaatimukset huomioon: Rajakuorma on käytön aikana suurin syntyvä kuorma ja murtokuorma on rajakuorma kerrottuna vaaditulla varmuuskertoimella.*

*Määräys 303. Varmuuskertoimen on 1,5, jos toisin ei ole määrätty.*

*Määräys 305. Rakenteen on kestävä rajakuormat ilman pysyvää muodonmuutosta. Lentokoneen turvallisen käytön kannalta muodonmuutos rajakuormaan asti ei saa olla haitaksi.*

*Määräys 307. Rakenteelle vaadittu kestävyys rajakuormilla on näytettävä toteen, joko laskennallisesti mikäli laskentatapa on luotettava, luotettavilla kuormituskokeilla tai todistuksella, jonka on antanut hyväksytty tarkastuslaitos.*

*Määräys 361. Moottorin vääntö*

*(a) Moottorin telineen kiinnityksineen on kestävä:*

*(1) rajavääntömomentti maksimi lentoonlähtöteholla ja pyörimisnopeudella kun kuormituskerroin on 3,0. (2) rajavääntömomentti maksimi. jatkuvalla teholla ja pyörimisnopeudella kun kuormituskerroin on 3,8.*

*(b) Mäntämoottoreille rajavääntömomentti saadaan kertomalla maksimitehon keskivääntömomentti seuraavilla kertoimilla riippuen sylinteriluvusta:*

*(1) 1,33 5 tai useammalle sylinterille, (2) 2,0 4 sylinterille, (3) 3,0 3 sylinterille, (4) 4,0 2 sylinterille, (5) 8,0 1 sylinterille*

*Määräys 363. Moottoripukki kiinnityksineen tulee kestää 1,5 kuormituskerroin sivusuunnassa. Muiden lentotilojen ei laskettu vaikuttavan sivuttaiskuormiin.*

*Määräys 371. Syntyneet hyrräkuormat maksimi jatkuvalla teholla, jotka voivat syntyä yhdessä sallittujen lentotilojen kuormien kanssa on moottorin asennuksen kestävä.*

*Määräys 603. Rakenteisiin käytettävien raaka-aineiden sopivuus ja kestävyys on a) näytettävä toteen kokemukseen tai kokeisiin perustuen, tai b) oltava tunnettujen normien mukaiset, jotka takaavat, että raaka-aineilla on suunnittelussa käytettyjen arvojen mukaiset lujuus- ja muut ominaisuudet. Kantavissa rakenteissa ja ohjainjärjestelmissä on materiaalien oltava ilmailulaatua vastaavia.*

*Määräys 605. Jos valmistusmenetelmät ovat ratkaisevia tuotteen laadulle (kuten liimaus, hitsaus, lämpökäsittely tai muovimateriaalien kovettaminen) on valmistuksen tapahduttava yleisesti ilmailukäyttöön hyväksyttävissä olevien (esim. materiaalivalmistajan suosittelemien) valmistusmenetelmien mukaisesti.*

*Määräys 607. Ruuviliitokset ja kaikki mekaaniset liitokset kantavissa osissa sekä ohjausjärjestelmässä ja muissa järjestelmissä, joilla on merkitystä turvallisuudelle, on oltava varmistettuja asianmukaisella tavalla. Liikkuvissa liitoksissa ei varmistus saa olla ainoastaan itse pidättävien mutterien varassa.*

*Määräys 609. Kaikki kantavat rakenteet tulee riittävässä määrin suojata korroosiota, kulumista, UV-säteilyä ja lahoamista vastaan. Rakenteen kaikkiin osiin on järjestettävä riittävät paineentasausreiät ja kerääntyvän nesteen poistumahdollisuus.*

*Määräys 901\* Moottorin asennuksen on taattava sen turvallinen toiminta, luokse päästävyys on sallittava huollot eikä moottoriasennus saa muodostaa vaaraa koneessa olijoille. Moottorin on oltava maadoitettu metallirakenteeseen.*

*Määräys 903 Moottorin on oltava hyväksytty tarkoitukseensa. Moottoreille asetettavat vaatimukset ilmenevät osasta H.*

*Määräys 905 Potkurin on oltava hyväksytty tarkoitukseensa. Potkureille asetettavat vaatimukset ilmenevät osasta J.*

*Määräys 925\* Potkurilla on oltava riittävä etäisyys lentokoneen rakenteeseen ottaen huomioon moottorin, potkurin ja rakenteen normaalin joustavuuden. Potkurilla on oltava riittävä etäisyys maahan, ottaen huomioon laskutelineen jouston ja renkaan rikkoutumisen, kaikissa normaaleissa asennoissa lentoonlähdössä, laskussa ja rullauksen aikana eri alustoilta. Vesikoneissa on potkurin oltava suojattu suoralta roiskevedeltä, erityisesti lentoonlähdön ja laskun yhteydessä.*

*Määräys 1191\* Moottori on eristettävä muusta lentokoneesta tuliseinällä, suojuksella tai vastaavalla menetelmällä. Tuliseinän ja suojauksen on oltava tulenkestävä ja suojattu korroosiota vastaan. (Suomalaisten ultrakevyiden lentokoneiden tarkastuskäsikirja, 2003).*

Voimansiirron ei tarvitse olla tyyppihyväksytty. Voimansiirtoa, potkuria ja moottorikokonaisuutta on koekäytettävä maassa vähintään 3 h ja koelennettävä vähintään 45 h. Tällä osoitetaan järjestelmän olevan riittävän luotettavan. Kokeiden aikana on tärkeä kiinnittää erityistä huomiota värähtelyjen ja resonanssivärähtelyjen vaaraan, jälkisaattojen tarpeeseen ja laakerien lämpötiloihin. Mikäli kaasutin on herkkä jäätymiselle, on moottori varustettava riittävän tehokkaalla imuilmanetulämmityksellä.

## 5 MOOTTORIN VALINTA

Tutkin kaikki Suomessa rakennusluvan saaneet Minisytkey-projektit ja yleisimpänä Minisytkeyn moottorina voidaan todeta olevan puolikas 2-sylinterinen Volkswagenin moottori. Lohko on keskeltä halkaistu ja takakanneksi on valmistettu alumiinilevy. Esimerkiksi Hummelin ja Moslerin valmistamat moottorit ovat VW-pohjalta rakennettuja.

Kai Mellén on valinnut prototyyppiin Mosler MMCB- moottorin, joka painaa 39 kg. Lentokoneen suunnittelussa valitaan ensin moottori, jonka ympärille rakennetaan lentokone. Tässä opinnäytetyössä on tarkoituksena valita moottori lentokoneeseen ja sen takia lähtökohtana moottorin valinnalle onkin hyvä pitää tämän moottorin teknisiä tietoja. Näistä teknisistä tiedoista ei ole syytä poiketa kovin paljon, koska lentokone on alun perin suunniteltu juuri tälle moottorille.

Lentokoneen moottorin valinnassa tärkeimpiä asioita on teho/paino-suhte. Moottorin paino vaikuttaa lentokoneen massakeskiön paikkaan koneessa. Massakeskiön on pysyttävä suunnittelijan määräämällä alueella. On myös mahdollista, että moottori on liian kevyt, jolloin lentokone tulee peräpainoiseksi. Tällöin joudutaan lisäämään painoa keulaan. Tätä nk. kuollutta painoa on aina syytä välttää. On myös mahdollista pidentää moottoripukkia, jotta koneen paino ei nouse.

Toisena rajoittavana tekijänä on yksipaikkaisen lentokoneen kuormattavuus, joka tulee olla vähintään 95 kg (Ilmailumääräys AIR M5-10/2004 2 ja 3.1).

Moottorin on myös oltava tehoiltaan lentokoneeseen sopiva niin, että suurimpia lento-ohjekirjan toiminta-arvoja ei ylitetä.

## 5.1 Moottorien vertailu

Tähän koneluokkaan on tarjolla niin kaksitahtisia kuin nelitahtisiakin moottoreita. Nykypäivänä UL-koneissa on siirrytty enimmäksään nelitahtisia moottoreita niiden polttoainetaloudellisuuden ja luotettavuuden ollessa parempi. Luotettavuus on usein vahva tunne, se muodostuu kokemuksista ja monista tarinoista. Yleisesti ajatellaan, että nelitahtinen moottori on luotettavampi. Se miksi kaksitahtisia ei pidetä niin luotettavina, lienee moottorin vaikeampi käyttö. On tunnettava kaksitahtisen moottorin ominaispiirteet. Olen sitä mieltä, että kaksitahtisetkin ovat varmoja ja luotettavia, kun niitä käytetään ja huolletaan valmistajan ohjeiden mukaisesti.

Moottorin valinnan lähtökriteereiksi päätetään, että moottorin on oltava nelitahtinen ja luotettava. Moottorista jätetään alkuvaiheessa pois sähköstartti ja laturi, jotka nostavat tarpeettomasti painoa. Ilmailuradio toimii omalla akullaan, ilman koneen latausjärjestelmää.

Laturin asennus olisi tulevaisuutta ajatellen kuitenkin tarpeellinen, koska transponderia, SSR- toisiotutkavastaajaa vaaditaan tietyissä ilmatilavyöhykkeissä (OPS M1-31 ja SERA.6005 b).

Moottoriksi valitsin 37-hevosvoimaisen Hummel-moottorin, josta löytyy kokemusta Minisytkyn moottorina. Tämä helpottaa tulevaa moottorin käyttöä, ongelmatilanteissa apua on helpommin saatavissa. Esittelen seuraavaksi moottoreita, jotka olivat varteenotettavia vaihtoehtoja konetyypille.

### 5.1.1 Mosler MMCB

Minisytkyn prototyypissä Kai Mellén käytti tätä moottoria. Mosler- moottoria on käytetty muutamissa Suomessa rakennetuissa Minisytkyissä (Kuva 3). Moottorin valmistus on tapahtunut Mosler Inc- yrityksessä Yhdysvalloissa Pohjois- Carolinassa. Yritys on myöhemmin tunnettu nimellä TEC (Total Engine Concepts),

joka on erikoistunut tehokkaisiin moottoreihin maantie-, rata- ja kiihdytyskäytössä. Vuodesta 1998 TEC lopetti tämän moottorin ja sen osien valmistuksen.

Mosler on Volkswagen autonmoottorista muunneltu puolikkaaksi lentokonemoottori. Moottori on perusmoottori, jossa ei ole laturia ja sähköstarttia. Moottori käynnistetään potkurista käsin heittämällä.

Prototyypissään Kai Mellén on tehnyt seuraavat muutokset perusmoottorille:

- Pakoputket on uusittu ja varustettu äänenvaimennuskartioilla ja jatkesuuttimilla.
- Imusarja on muutettu B-osaiseksi ja kaasutin laskettu alemmaksi.
- Moottoriin on lisätty imuilman etulämmitin ja vaihtventtiili kurkkuputkineen.
- Moottoriin on asennettu ilmanottoaukon suojaverkko.
- Moottoriin on asennettu öljynsuodatin kiinnitysosineen ja letkuineen.



Kuva 3. Mosler MMCB-moottori

#### 5.1.2 Hummel VW-moottori

Hummel-engine on erikoistunut valmistamaan moottoreita keveisiin harraste- ja UL-luokan lentokoneisiin (Kuvat 4 ja 5). Yritys sijaitsee Yhdysvalloissa, Arizonan osavaltiossa. Moottoreita saa erilaisilla varustuksilla. Moottorin voi ostaa joko uudella tai peruskorjatulla loholla. Siihen voi asentaa startti/generaattori

paketin ja se voidaan valita kaksoissytytyksellä. Seuraavassa on kaksi samanpainoista vaihtoehtoa eri tehoisina:

**37 HP** 92 mm bore x 78 mm stroke 1037 cc 81 to 103 lbs. Options-New Case, Battery Ignition, Dual Ignition, Bed, Radial or Mosler Mounting, Aluminum NiCom Cylinders, Starter, Alternator.

**45 HP** 94 mm bore x 86 mm stroke 1200 cc 84 to 102 lbs. Options-New Case, Battery Ignition, Dual Ignition, Bed, Radial or Mosler Mounting, Starter, Alternator This engine comes standard with Aluminum NiCom Cylinders.

45 hevosvoimaisessa moottorissa on kasvatettu männän halkaisijaa ja iskupituutta, jotka tuovat lisää tehoa.



Kuva 4. Hummel-moottori

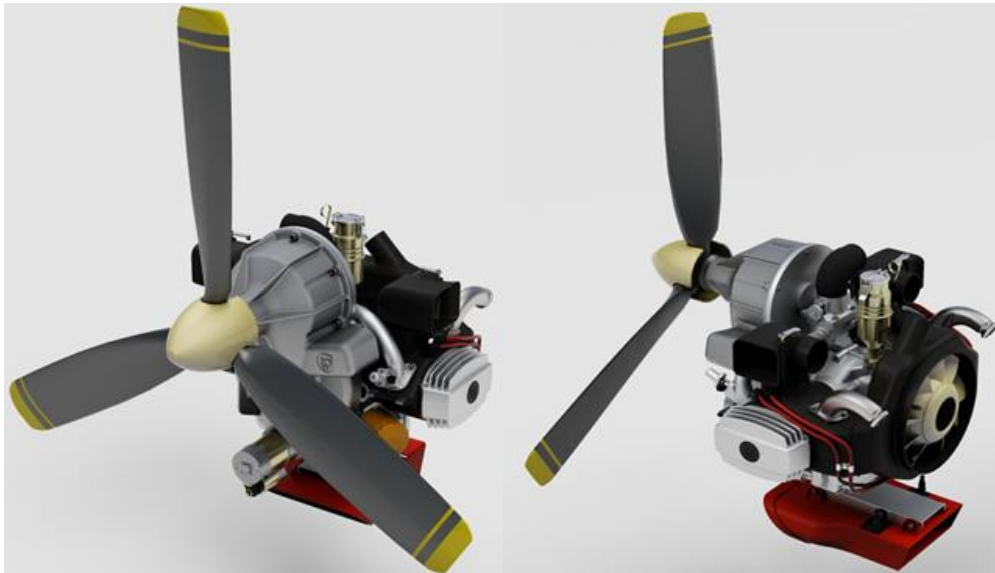


Kuva 5. Hummel-moottori

Tämä moottori on teknisesti ja suorituskyvyltään lähelle samanlainen, kuin ensimmäisessäkin Minisitykyssä ollut Mosler-moottori.

### 5.1.3 SAVOIA S42Aero moottori

SAVOIA S42Aero moottori on yksi vaihtoehto Minisitykyn moottoriksi. Moottoria on saatavissa Argentiinalaiselta Savoiacars-yritykseltä (Kuva 6). Tässä moottorissa on enemmän lisälaitteita ja moottori on varustettu alennusvaihteistolla. Hummel-moottorin valintaa puoltaa sen yksinkertaisuus ja käyttökokemusta löytyy Suomesta.



Kuva 6. SAVOIA S42Aero moottori

2- sylinterinen, nelitahtinen, ilmajäähdytetty puhaltimella plus erotettu öljynjäähdytin termostaatilla.

- $652 \text{ cm}^3$ , 9.5:1 puristuksella
- polttoaineen ruiskutus ja kaksoissytytys, ECU kahdella ohjelmalla
- 12 v sähkökäynnistin ja 10A PMG generaattori
- Maksimi teho: 42 HV (30 kw) 6000 kierroksella
- vääntö 55 Nm 4000 ja 5000 kierroksen välillä
- 95 oktaaninen bensiini ja kulutus: 195-200 g/kw h
- Hihnavaihteisto kiristäjällä, vastapäivään pyörivä
- kokonaispaino: 48 kg.



## 6 MOOTTORIPUKIN LUJUUDEN TARKASTELU

Moottoripukin suunnittelun lähtökohtana on ilma-aluksen ja moottorin tekniset tiedot.

Opinnäytetyöni moottoripukin lujuustarkastelussa on käytetty suomalaisen ultrakevyiden ja harrasterakenteisten lentokoneiden tarkastuskäsikirjaa.

Vaatimukset kestävyydelle tulevat erilaisista moottoripukkia kuormittavista lentotiloista. Jotta rakenteen kestävydestä päästään varmuuteen, tulee rakenteen luotettavuus todeta laskemalla. Laskelmissa on otettava huomioon kaikki mahdolliset kuormitukset, jotka voivat muodostua eri käyttötilanteissa.

Tässä opinnäytetyössäni arvioin olemassa olevan moottoripukin kestävyys ja huomioiden sen, että moottoria on siirrettävä eteenpäin noin 7 cm (Kattelus 2015). Moottoripukin pidentäminen on tarpeen lentokoneen massakeskiöpitäminen pitämiseksi sallitulla alueella.

### 6.1 Lujuustarkastelu

Tärkeitä tietoja moottoripukin suunnittelulle ovat:

Sylinteriluku	2
Moottorin massa	46.8 kg
Startti + gen	10 kg
Suurin teho	37 hp = 27,206 kW
Staattinen veto	70 kg

Hyrrävoimien laskemista varten tarvittavat tiedot:

Maksimi matkalentokierrokset	3200 rpm
Maksimi kierrokset	3600 rpm
Lentokoneen nopeus	160 km/h

Potkurin massa	1,84 kg
Spinnerin massa	1,08 kg
Potkurin koko	1170 X 915 mm (46 in x 36 in)

Hyrrävoimien vaikutus Minisyttyssä tulee olemaan hyvin pieni. Lujuuden tarkastelussa sitä ei tarvitse ottaa huomioon, koska jo kuormitusmonikerrat kuormittavat moottoripukkia enemmän (Suokas 2015). Hyrrävoimien vaikutus korostuu taitolentokoneessa, jossa on tehokas moottori ja suunnan muutokset nopeita. Pyörivä massa pyrkii vastustamaan akselin asentoon kohdistuvia muutoksia.

Moottoripukin raaka-aineena on kromimolybdeeniteräsputki (AISI 4130), jota käytetään yleisesti lentokoneen rakennuksessa hyvän lujuuden, sekä hitsattavuuden ja työstettävyyden ansiosta. 4130 CrMo levy- ja putkimateriaalille on käytetty seuraavia arvoja (Taulukko 3).

Taulukko 3. KromiMolybdeeniteräksen lujuusarvot

4130 CrMo		
Murtojäännitys	$\delta$ max	655 N/mm <sup>2</sup>
Kimmoraja	$\delta$ yield	515 N/mm <sup>2</sup>
Leikkausjännitys	$\tau$ maksimi	340 N/mm <sup>2</sup>
Kimmoduuli	E	204 kN/mm <sup>2</sup>
Liukukerroin	G	76 kN/mm <sup>2</sup>
Suurin laakeri lujuus	$\delta$ maksimi	1380 N/mm <sup>2</sup>
Suurin sallittu kantavuus		890 N/mm <sup>2</sup>
Kovuus	HV min	195

Varmuuskertoimina laskennassa on käytetty arvoa  $1.5 * 1.15 = 1.725$ . Kerroin 1.5 on tarkastuskäsikirjan mukainen varmuuskerroin ja kerroin 1.15 on lisävarmuuskerroin. Näin sallituksi jännitykseksi saadaan  $515/1.725 = 298$  MPa. Arvot pätevät myös hitsatulle rakenteelle, jos rakenne normalisoidaan yli HV 195.

Moottoripukin putken ulkohalkaisija on 16 mm ja sisähalkaisijan 14 mm.

### 6.1.1 Vääntömomentti

Käsikirjan kohdan 361 mukaan moottoripukki kiinnityksineen on kestävä raja-  
vääntömomentti maksimi lentoonlähdevoimalla ja pyörimisnopeudella kuormitus-  
kertoimella 3 ja jatkuvalla voimalla ja pyörintänopeudella kuormituskertoimella  
3,8. Vääntömomenttia tälle moottorille ei ole ilmoitettu, mutta se saadaan las-  
kemalla (Kaava 1).

$$P = M\omega \quad (1)$$

Missä

P	on	teho	[w]
M	on	momentti	[Nm]
$\omega$	on	kulmanopeus	$\left[\frac{RAD}{s}\right]$

Kulmanopeus saadaan laskemalla kaavalla 2:

$$\omega = 2\pi n \quad (2)$$

Missä

$\omega$	on	kulmanopeus	$\left[\frac{rad}{s}\right]$
n	on	pyörintänopeus $[n] = 1/s$ (kierr/s)	$\left[\frac{1}{s}\right]$

Kaavaa 1. pyörittämällä saadaan momentiksi:

$$M = \frac{P}{\omega}$$

Moottorin vääntömomentiksi saadaan 72,16 Nm. Vääntömomentti kerrotaan  
neljällä, joka on kerroin kaksisylinterisille moottoreille tarkastuskäsikirjan mää-  
räyksen 361 mukaan. Saadaan momentiksi 274,23 Nm, jonka vähintään moot-  
toripukin on kestävä.

### 6.1.2 Työntövoima

Työntövoima valitsemallani moottorilla tulee olemaan noin  $70 \text{ kg} = 686,47 \text{ N}$  (Kattelus 2015). Työntövoima ilmenee suorana vetovoimana lentokoneen pituusakselin suhteen. Tämä vetovoima kohdistuu moottorin kiinnityspultteihin, moottoripukkiin ja kiinnityksen tuliseinäin.

### 6.1.3 Kuormitusmonikerta

Kuormituskerroin tarkoittaa lentokoneen nostovoiman ja painon välistä suhdetta lennolla (321, Tarkastuskäsikirja).

Tarkastuskäsikirjan kohta 363 sanoo, että Moottoripukin on kestettävä kuormituskerroin 1,5 sivusuunnassa. Moottoripukki, moottori ja potkuri painavat yhteensä 59,72 kg. Olen huomionut tässä painossa käynnistysmoottorin ja generaattorin massan, joka on 10 kg. Massasta aiheutuu siis 585,65 N voima. Tämä voima kerrottuna 1,5:lla saadaan 878,475 N voima, jonka moottoripukki on kestettävä sivusuunnassa.

Tarkastuskäsikirjan kohta 337 sanoo, että rajakuormituskertoimen on oltava vähintään  $V_A$  nopeudella +3,8 ja -1,5. Tämä voima kerrottuna 3,8:lla saadaan maksimi positiivinen kuormitus, joka on 2225,47 N. Negatiivinen kuormitus on – 878,475 N.

Nämä lasketut voimat ovat maksimivoimia, jotka aiheutuvat rakennetta kuormittaessa. Toisin sanoen lentäjä saa kuormittaa lentokonetta liikehtimällä edellä mainituilla kuormituskertoimilla. Lentokäsikirjassa voi olla myös suuremmat maksimikuormituskertoimet, jotka riippuvat konetyypistä.

## 7 FEM-ANALYYSI

Autodesk Inventorin Finite Element Analyysillä voidaan tehdä tietokoneavusteisesti kuormitussimulointi kolmiulotteisille osille, kokoonpanolle tai levyosille. Staattinen kuormitusanalyysi laskee rakenteen jännitykset, venymät ja muodonmuutokset.

FEM-analyysia varten tarvitaan mallinnettu osa tai kokoonpano. Seuraavassa kerrotaan FEM-analyysin suoritusvaiheet (Taulukko 4).

Mallinnuksen yhteydessä annetaan geometrialle materiaaliominaisuudet. Aluksi rakenteeseen kohdistetaan voima ja sen suuruus. Kuormitus voi olla voima, paine, laakerivoima tai momentti. Valitaan osasta kiinteä piste, joka pysyy osaa kuormittaessa paikallaan. Luodaan kontaktit eri komponenttien välille. Seuraavaksi voidaan sulkea pois ne osien komponentit joiden lujuutta ei ole tarpeen tarkastella. Tämä nopeuttaa simulointia turhien osien jäädessä pois laskennasta. Näistä osista kuitenkin näkyvät ääriviivat myös simuloinnin yhteydessä. Sitten luodaan verkko läpi tarkasteltavien osien. Ohjelma laskee verkon solmupisteiden rajaaman alueen jännitykset ja muodonmuutokset. Suoritetaan simulointi, jossa ohjelma laskee rakenteelle kohdistuvat kuormitukset.

Simuloinnin jälkeen ohjelma näyttää väriskaalalla sinisestä punaiseen rakenteeseen kohdistuvat kuormitukset. Väriskaala on hyvä säätää niin, että rakenteesta löytyvä maksimijännitys asetetaan punaiseksi. Näin on helpompi tarkastella miten jännitykset jakautuvat rakenteeseen. Probe-työkalulla on helppo tarkastaa jännitys tietystä pisteestä. Tätä työkalua olen käyttänyt hyväksi moottoripukin analysoinnissa.

Taulukko 4. FEM-analyysin toimenpideluettelo (Autodesk Inventor 2014)

<b>FEM- analyysin toimenpideluettelo</b>	
1	osan luonti eli mallinnus
2	annetaan materiaalin ominaisuudet
3	voiman kohdistaminen
4	kiinteän pisteen luominen
5	kontaktien luonti osien välille
6	tarpeettomien osien poissulkeminen
7	verkon luonti
8	simulointi
9	tarvittaessa osan uudelleen muokkaus
10	tulokset
11	raportti

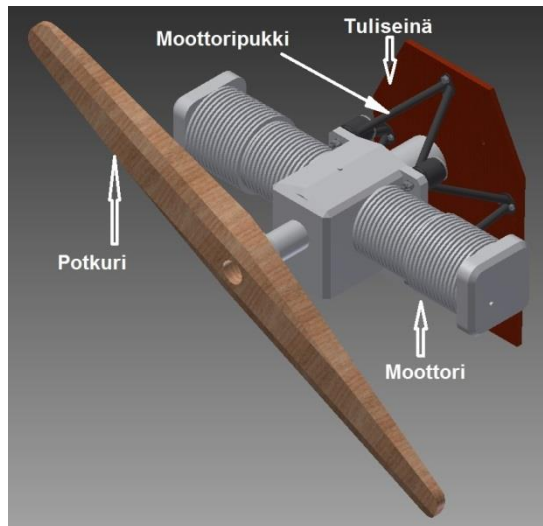
### 7.1 FEM vs. analyttinen laskenta

FEM- analyysillä päästään hyvinkin tarkkoihin tuloksiin. On kuitenkin tärkeä huomata, että se on vain apuväline. Suunnittelijan on tärkeä ymmärtää mistä ja miten erilaiset kuormat ja jännitykset muodostuvat. Suunnittelijan tulee tietää millaiset, minkä kokoiset ja minkä suuruiset voimat rakenteeseen vaikuttavat. Hyvä suunnittelijan ominaisuuksia on myös se, että hän ymmärtää materiaaleista paljon. Materiaalien lujuuteen vaikuttaa osien valmistustapa, valu, valssaus, koneistus jne.

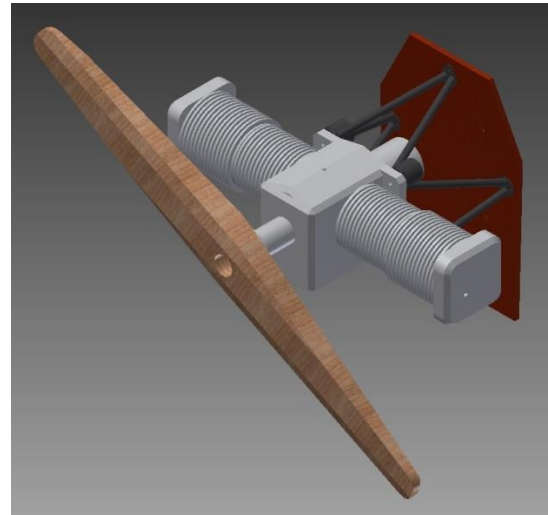
### 7.2 Moottoripukin FEM-analyysi

Lujuustarkastelua varten loin Inventorilla mallin tämänhetkisestä moottoripukista (Kuva 7), 7 cm pidemmästä moottoripukista (Kuva 8) ja mallin lisäjätköpalojen kanssa (Kuva 9). Mallissa tuliseinä asetettiin kiinteäksi kappaleeksi. Positiivisen kiihtyvyyden aiheuttama maksimivoima on kuormitettu arvioituun moottorin massakeskipisteeseen, joka on 11cm moottorin takakannesta eteenpäin. Myös

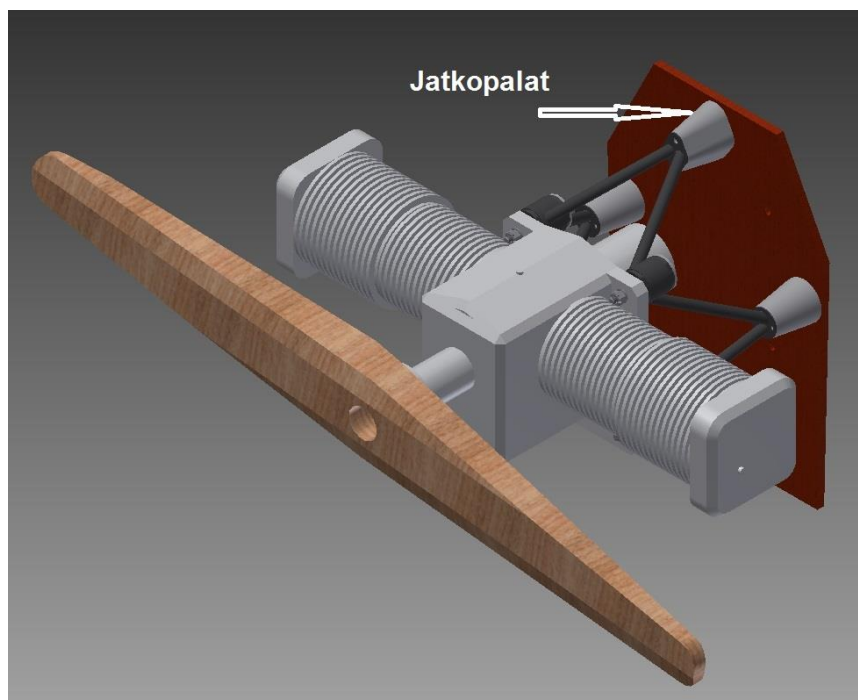
negatiivinen ja sivuttaisvoima on kohdistettu massakeskipistettä kohti. Minun työssäni potkuri on jätetty simuloinnin ulkopuolelle.



Kuva 7. Alkuperäinen moottoripukki



Kuva 8. Pitkä moottoripukki

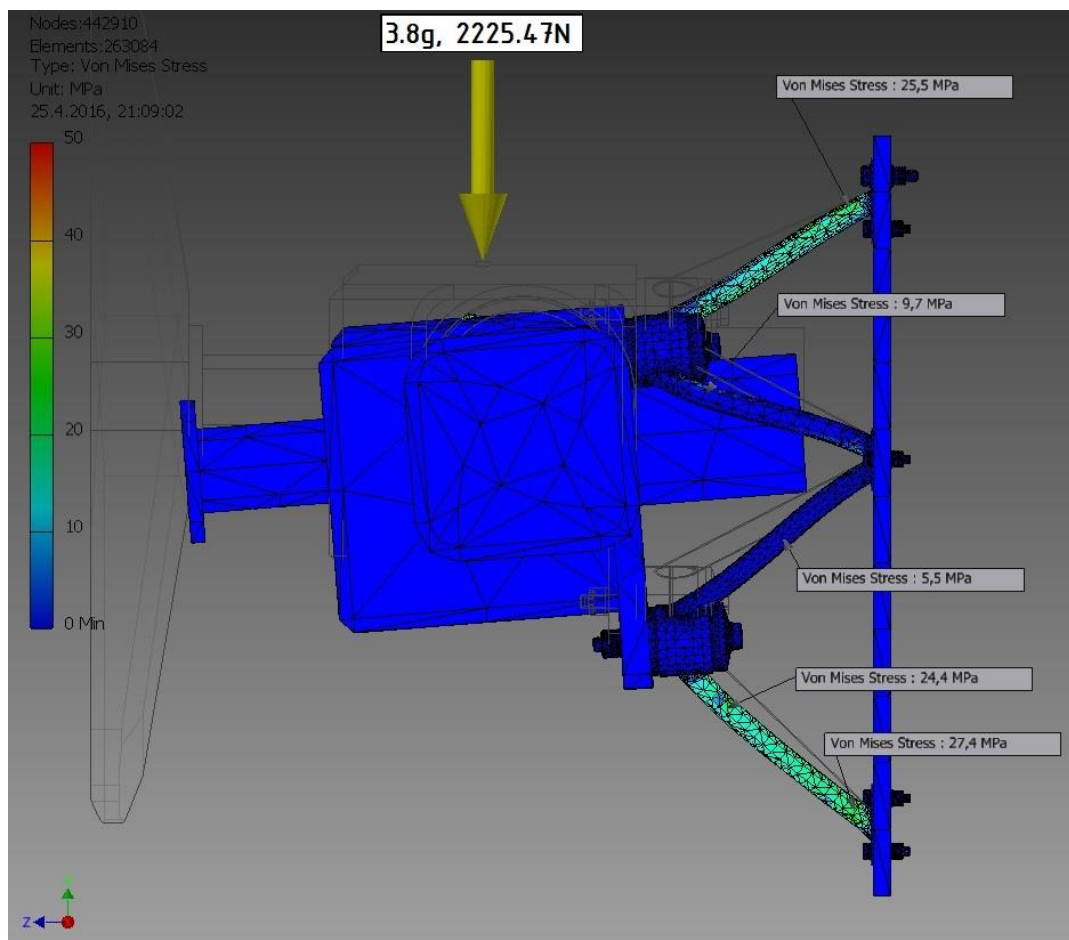


Kuva 9. Moottoripukki jatkopaloilla

FEM-analyysissä loin moottoripukille oikean materiaalin syöttämällä CrMo-teräksen oikeat lujuusarvot. Syötettävät arvot ovat: kimmokerroin ( $E$ ), myötöraja ( $\sigma_m$ ), murtojännitys ( $\sigma_M$ ) ja leikkausjännitys ( $\tau$ ). Näiden lujuuksien ja materiaaliominaisuuksien mukaan ohjelma suoritti lujuusanalyysit.

Seuraavissa kuormitusmonikerran simulointikuivissa olen antanut punaiselle värille arvoksi 50 MPa. Näin siksi, että kuvia vertaamalla on helpompi arvioida keskinäisiä jännityksiä. Suurin jännitys tulee lähelle tätä arvoa. Kuivissa 16 ja 17 punaisen arvoksi olen muuttanut 5 MPa, koska putkiin kohdistuvat jännitykset olivat niin pienet, että ne eivät olisi tulleet väriskaalassa näkyviin.

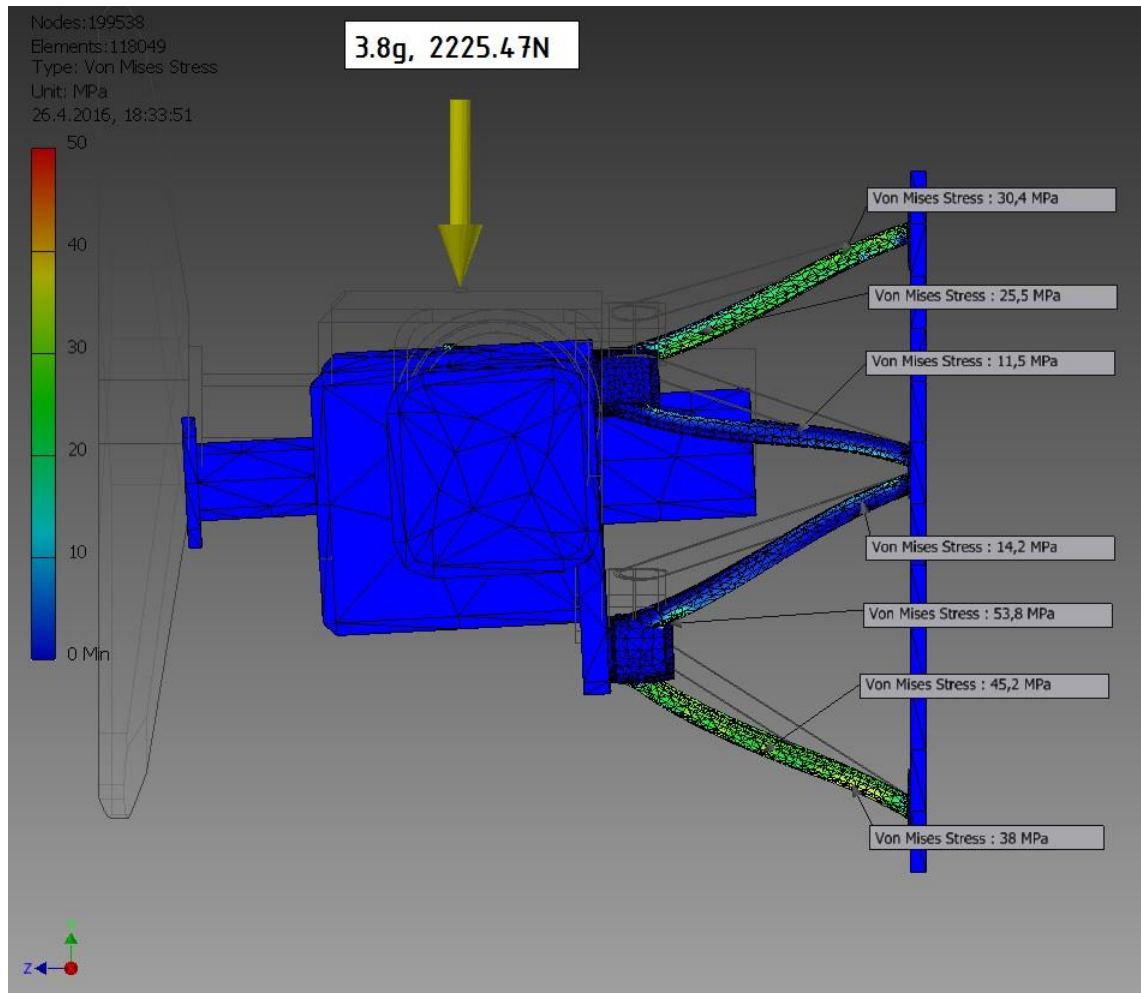
Alkuperäinen moottoripukki kuormitettuna 3.8-kertaisella positiivisella kuormituskertoimella (Kuva 10). Analyysistä nähdään, että suurimmat voimat kohdistuvat ylä- ja alapuolen putkiin.



Kuva 10. Alkuperäinen moottoripukki, 3,8g:n positiivinen kuormitus

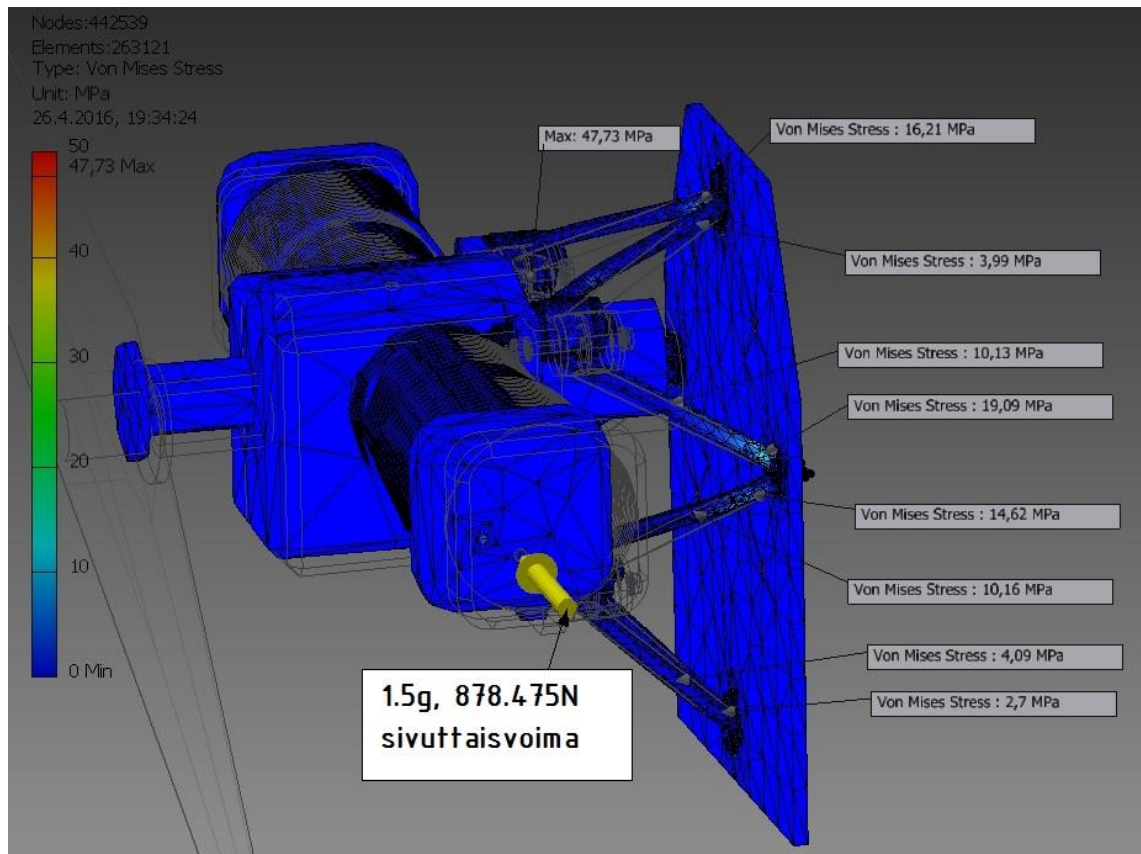


Kuormitusanalyysin avulla nähdään se, että moottoripukkia 7cm pidennettäessä kaikkien putkien jännitykset suurenevät (Kuva 8). Edelleen pysytään turvallisen kaukana 298 MPa: in maksimi jännityksestä mikä putkille sallitaan.



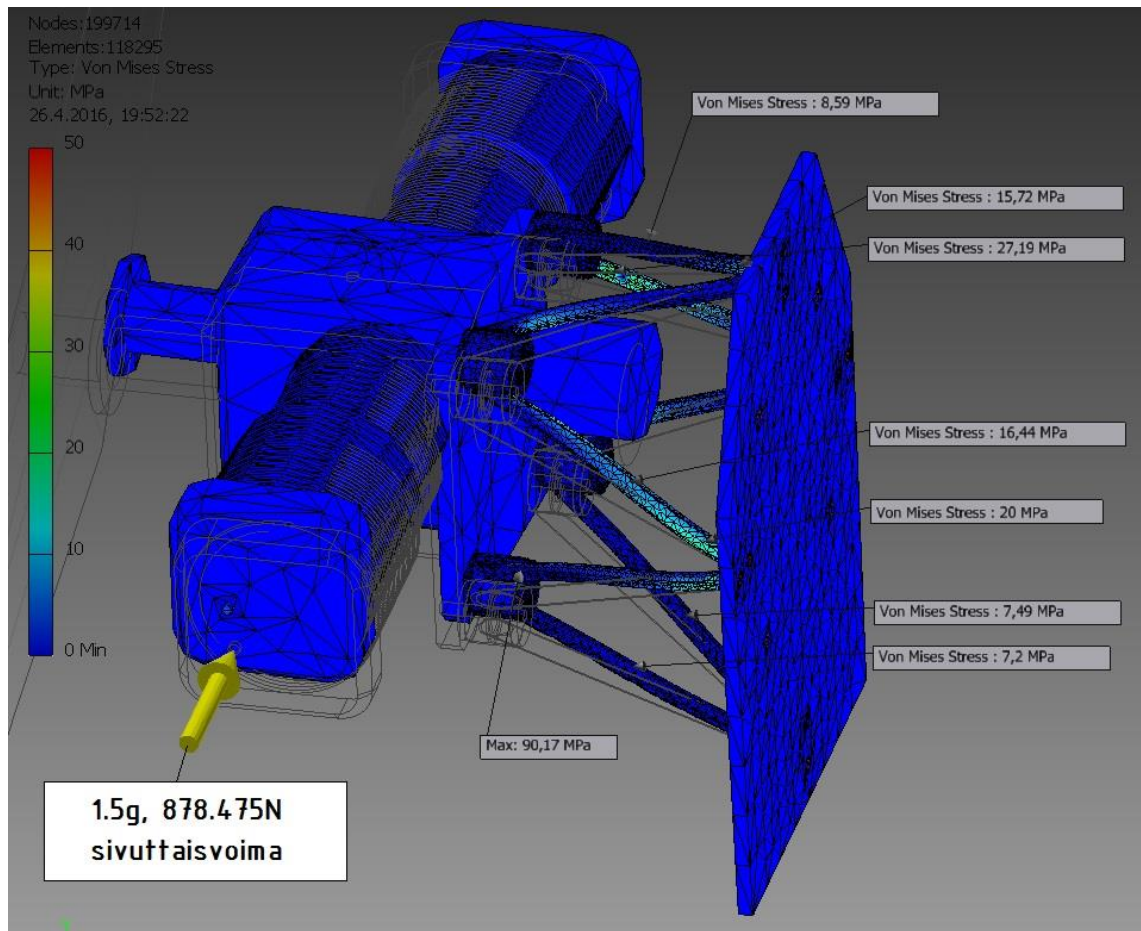
Kuva 11. Pidennetty moottoripukki, 3,8 g:n positiivinen kuormitus

Sivuttaisista voimista ei kohdistu niin suuria jännityksiä kuin positiivisesta 3,8-kertaisesta kuormitusmonikerrasta (Kuvat 9 ja 10). Sivuttaiset voimat eivät tule olemaan merkittäviä voimia tässä moottoripukissa. 47,73 MPa: n maksimi jännitys muodostuu yläputken ja tärinänvaimenninholkin liitoskohtaan. Tämä on luonnollista koska liitos ei ole nivelöity. Rakenne on jäykkää yhtenäistä rakennetta.



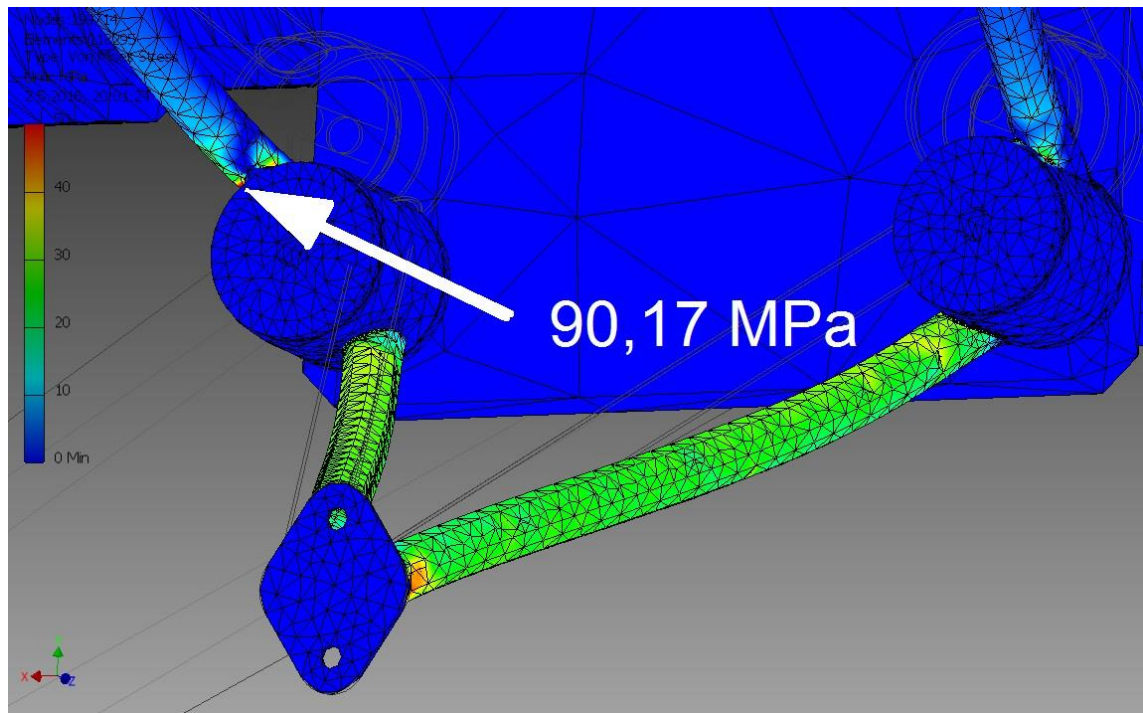
Kuva 12. Alkuperäinen moottoripukki 1,5 g:n sivuttaisella kuormituksella

Pitemmällä moottoripukilla putkiin kohdistuu myös suuremmat jännitykset sivuttaisessa kuormituksessa kuin lyhyempäänkin moottoripukkiin (Kuva 13).



Kuva 13. Pitempi moottoripukki 1,5 g:n sivuttaisella kuormituksella

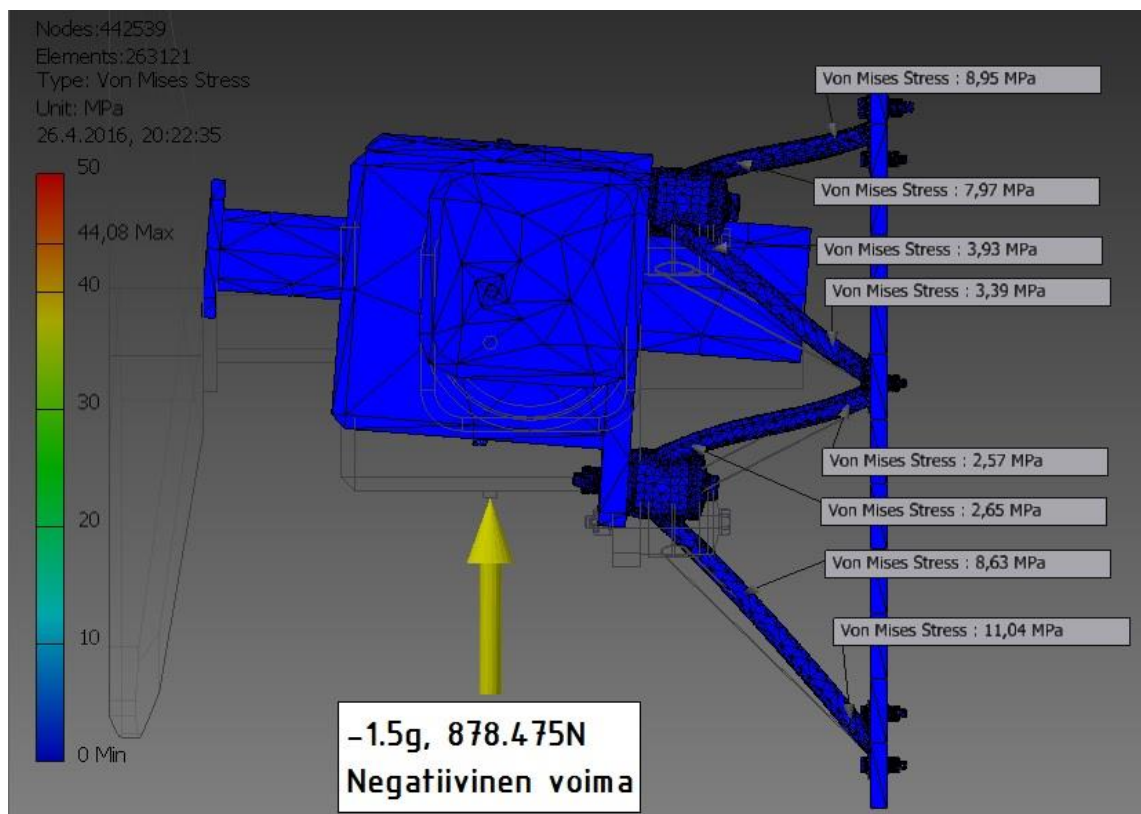
Maksimivoima 90,17 MPa muodostuu alaputken ja tärinänvaimennusholkin liitoskohtaan. Lujuusanalyysi paljasti tämän pistemäisen kuorman ja se johtuu siitä, että putken leikkaus jää hieman holkin takareunan takapuolelle (Kuva 14). Putkea hitsattaessa putki pitää asettaa keskelle holkkia. Hitsattu moottoripukki vähentää tätä jännitystä.



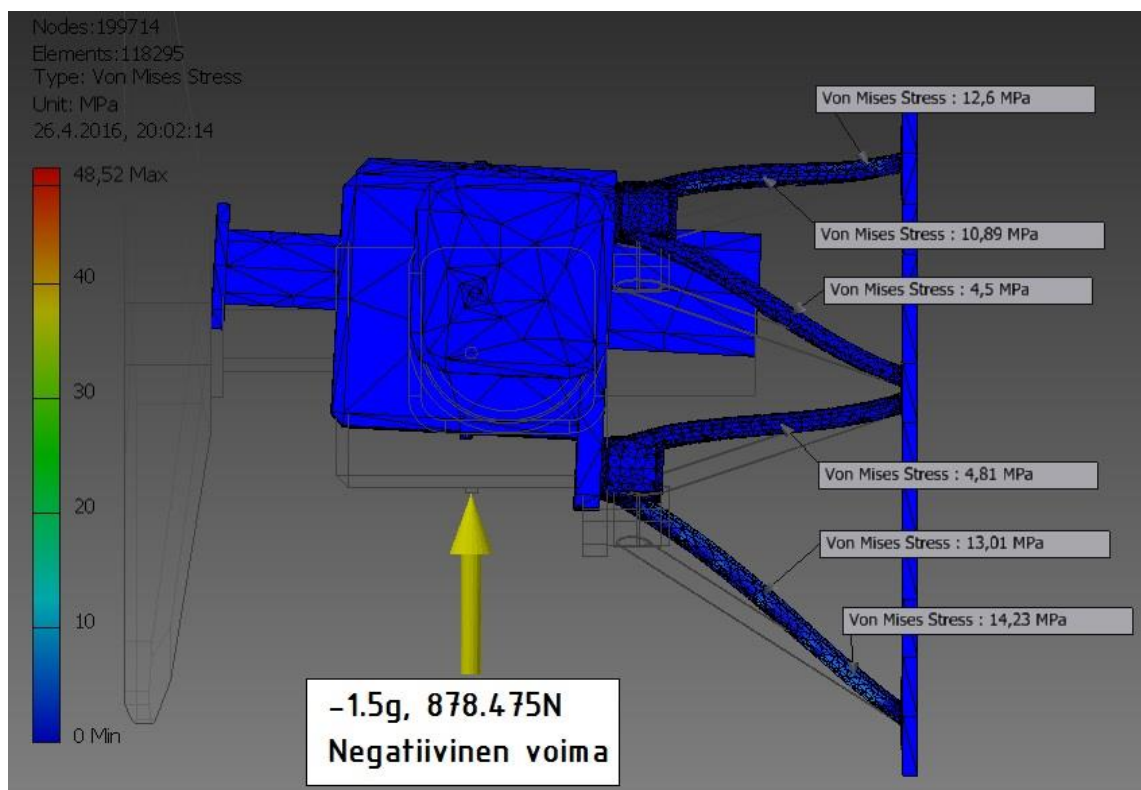
Kuva 14. Liitoskohdan maksimijännitys

Negatiivisesti moottoripukkia kuormitettaessa jännitykset putkille ovat pieniä, ollaan kaukana turvallisella puolella CrMo-teräksen maksimikestävyydestä. Tässäkin tapauksessa pitemmälle moottoripukille muodostuu suuremmat jännitykset putkiin. (Kuvat 15 ja 16).



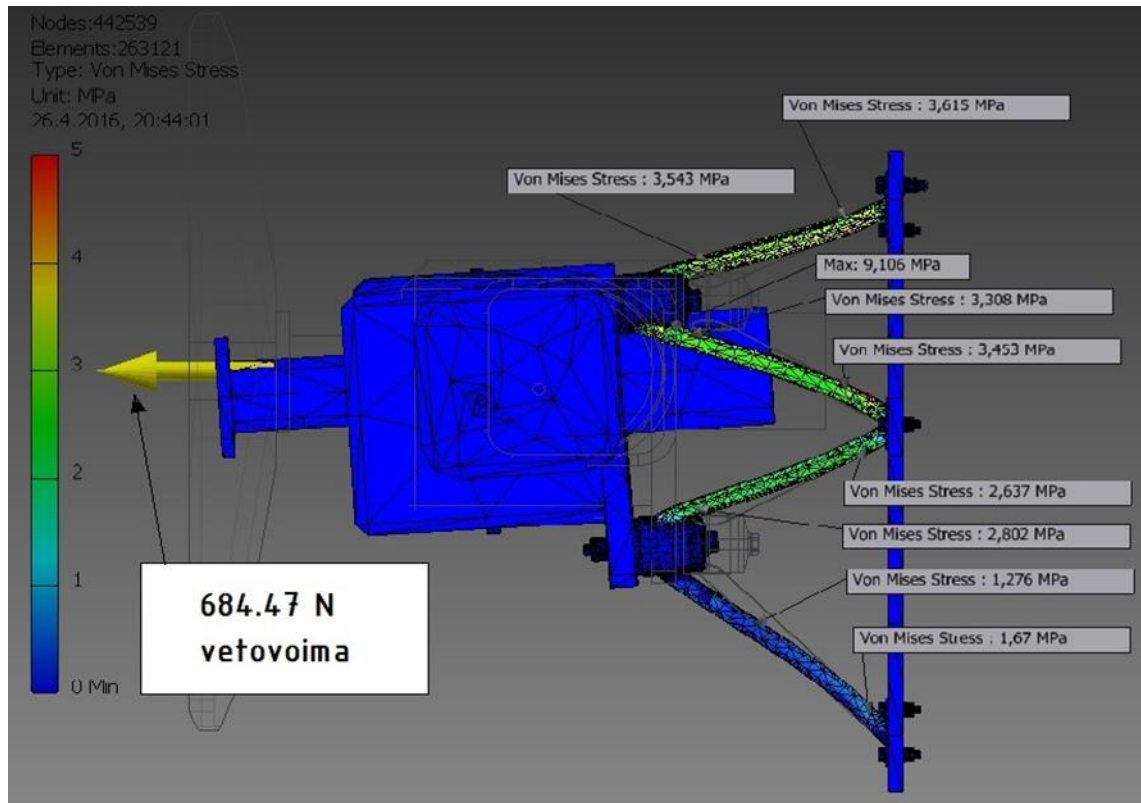


Kuva 15. Alkuperäinen moottoripukki 1,5 g:n negatiivisella kuormituksella

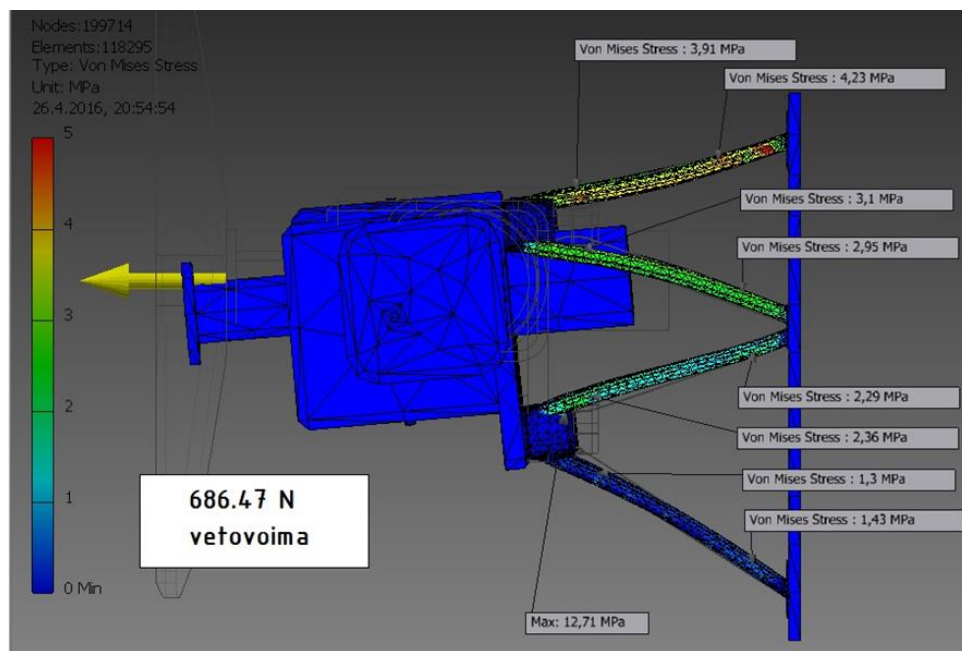


Kuva 16. Pitempi moottoripukki 1,5 g:n negatiivisella kuormituksella

Potkurin aiheuttaman vetovoiman tuomat jännitykset moottoripukkiin ovat pienemmät, kuin lentotilojen aiheuttamat kuormitusmonikerrat (Kuvat 17 ja 18). Vetovoimasta aiheutuvat jännitykset jakautuvat tasaisemmin kaikkiin putkiin. Yläputkien jännitykset ovat suuremmat, koska vetovoima kohdistuu moottoripukin keskilinjan yläpuolelle.

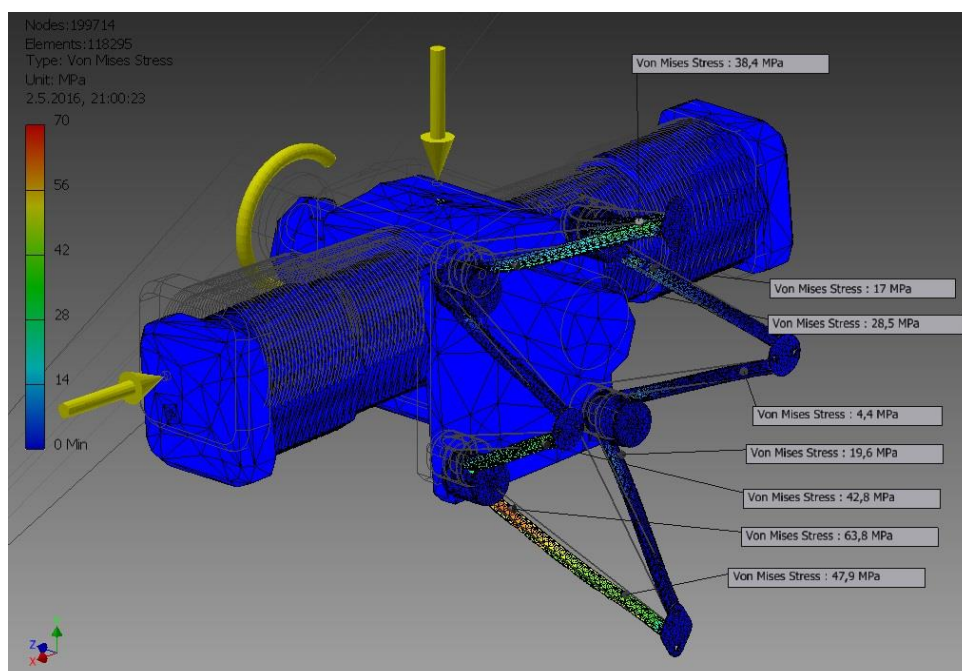


Kuva 17. Alkuperäinen moottoripukki, 684,47 N vetovoima



Kuva 18. Pitempi moottoripukki 684,47 N vetovoima

Kokonaiskuormitus 3,8 g:n positiivisella ja 1,5 g:n sivuttaisella, sekä Nm: n vääntömomentin kuormituksella aiheutuvat pitempään moottoripukkiin kuvan 19 suuruiset jännitykset. Maksimijännitys on: 63,8 MPa. Moottorin pyörimissuunnalla on merkitystä putkiin tuleviin jännityksiin. Vastapäivään pyörivä moottori suurentaa entisestään jännityksiä vasemman puoleisissa moottoriputkissa.



Kuva 19. Kokonaiskuormitus

## 8 TULOKSET JA YHTEENVETO

Moottorin valinnassa päädyin Hummel-moottoriin. Moottori on yksinkertainen ja sen lisäksi Suomesta löytyy kokemusta siitä Minisytlyn moottorina.

Opinnäytetyössäni moottoripukin osalta päädyin siihen, että paras tapa on hitsata se uudelleen oikean mittaisista putkista. Tarvittava pukin pidennys on 7 cm. Vaihtoehtona oli myös pidentää pukkia erillisillä jatkopaloilla. Jatkokappaleet nostavat kuitenkin enemmän painoa kuin hiukan pitemmät teräsputket. Pitempi moottoripukki on myös lujempi, sekä osien määrä on myös vähäisempi.

FEM-analyysillä pääsin siihen tulokseen, että moottoripukki ei tule kuormittumaan missään lentotilassa lähellekään sallittua maksimijännitystä. Näin ollen moottoripukki on täysin turvallinen vaikka sitä pidennettäisiin seitsemällä senttimetrillä. Tämän mallinen moottoripukki on yksinkertaisin mitä olen koskaan nähnyt.

Suurimmaksi jännitykseksi pitemmässä moottoripukissa kokonaiskuormituksella saatiin n. 63,8 MPa. Kun materiaalin kimmorajan jännitys jaetaan todetulla maksimijännityksellä (63,8 MPa) saadaan 8,07-kertainen varmuuskerroin materiaalin myötämiseen nähden. Moottori pukki täyttää siis selvästi tarkastuskäsikirjassa esitetyt vaatimukset. Tästä tuloksena voi päätellä, että pidennetty moottoripukki on rakenteeltaan erittäin luja kestämiin tulevat kuormitukset.

Kuvan 14 maksimi jännitys kertoo siitä, että kriittisimmät paikat ovat moottoripukin osien liitoskohdissa. Rakenteen lujuuden säilyttämiseksi on hitsausliitosten onnistuttava.



## 9 POHDINTA

Lentokoneen suunnittelutyö on hyvin vaativaa, joka päällimmäisenä mieleen nousee tehtyäni tämän opinnäytetyön. Suunnittelijoilla on tavoite tehdä rakenteista niin kevyitä kuin mahdollista ja samanaikaisesti pitää rakenteet turvallisina ja luotettavina.

Moottoripukin FEM-analyysin tulokset voisi varmistaa käyttämällä hyväksi venymäliuskemittausta. Venymäliuskemittauksessa liuskan vastus muuttuu, kun liuskan mitta muuttuu.

Moottoripukin kestävyys voitaisiin todeta myös kuormittamalla se käytännössä. Moottoripukki kiinnitettäisiin tukevaan telineeseen. Pukkiin asennettaisiin moottorin painoinen esine jonka massakeskipisteeseen kohdistettaisiin voimat, joiden moottoripukin on vähintään kestävä. Tarvittava voima saataisiin aikaan punnuksilla. Toista ylimääräistä moottoripukkia voisi kuormittaa rikki asti ja tehdä tästä uusi lujuusanalyysi.

Tuloksissa on jonkin verran epätarkkuutta, mutta riittävä varmuus lujuudesta on saavutettu. 8,07-kertainen varmuuskerroin on suuri. Lujuutta ajatellen moottoripukkia voisi keventää vaihtamalla putkimateriaali ohuempaan. Hitsausliitokset on kuitenkin helpompi tehdä vahvemmillä putkillla. Lisäksi 1 kg:n painoisesta moottoripukista, joka on vielä primäärirakennetta ei ole tarvetta tehdä kevennyksiä.

## LÄHTEET

- Autodesk Inventor 2014. Internetsivut. Viitattu 30.4.2015.  
<http://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2014/ENU/?guid=GUID-520D4077-0F8C-461B-86B2-6A211EA0822C>
- Hummel Engines 2015. Internetsivut. Viitattu 20.4.2015.  
<http://www.hummelengines.com/enginespecs.pdf>
- Hummel Engines 2015. Internetsivut. Viitattu 20.4.2015.  
<http://www.hummelengines.com/pricelist.pdf>
- Ilmailulaki 7.11.2014/864.
- Ilmailumääräys 26.1.2004/AIR M5-10 Ultrakeveiden lentokoneiden lentokelpoisuus, valmistus ja rekisteröinti.
- Ilmailumääräys 25.11.1996/AIR M5-1 Harrasterakenteisen ilma-aluksen lentokelpoisuusvaatimukset.
- Ilmailumääräys 13.11.2014/OPS M1-31 Transponderivyöhykkeet.
- Ilmailutiedotus 15.12.2003/AIR T14-1 Lentokelpoisuusmääräykset ja tiedotteet.
- Kattelus, J. 2015 Minisytky-rakentajan. Haastattelu. 30.10.2015.
- Luettelo lentokelpoisuusmääräyksistä- ja tiedotteista 13.4.2015, 53-55 ja 72.  
<http://www.trafi.fi/filebank/a/1428920439/010afd990b67a8c2fdc700abe1e43d17/15298-lentokelpoisuusluettelo.pdf>.
- Mellén, K. 2015. Minisytky-suunnittelija. Haastattelu. 20.10.2015.
- Mellén, K. 1997. Tekninen piirustus. Moottori. 18.6.1997.
- Mertamo, P. 2005. Minisytky internetsivut. Viitattu 17.4.2015.  
<http://gamma.nic.fi/~wilpu/panu2.htm>
- Mustonen, H. 2013. Mini - Sytky – näppärä experimental - kone. Viitattu 17.4.2015.  
<http://ilmailu.fi/ilmailu-lehti/mini-sytky-n-pp-r-experimental-kone>
- Polytekniikkojen ilmailukerho ry 2016. Internetsivut. Viitattu 17.4.2015.  
<http://pik.ayy.fi/joomla/index.php/home/pik-sarja#pik26>
- Suokas, A. 2015. Windcraft Oy. Di. Haastattelu. 29.10.2015
- Trafi. 2015. Internetsivut, tietoa trafista. Viitattu 9.4.2015.  
[http://www.trafi.fi/tietoa\\_trafista](http://www.trafi.fi/tietoa_trafista).

Trafi. 2014. Ilma-alusrekisteri 1.1.2014.

[http://www.trafi.fi/filebank/a/1389267975/01849cf59f8ef217b9071437cb5dcd0d/13990-Rekisteri\\_1\\_1\\_2014.pdf](http://www.trafi.fi/filebank/a/1389267975/01849cf59f8ef217b9071437cb5dcd0d/13990-Rekisteri_1_1_2014.pdf).

Suomalaisten ultrakevyiden lentokoneiden tarkastuskäsikirja Muutos 1, 12.6.2003.

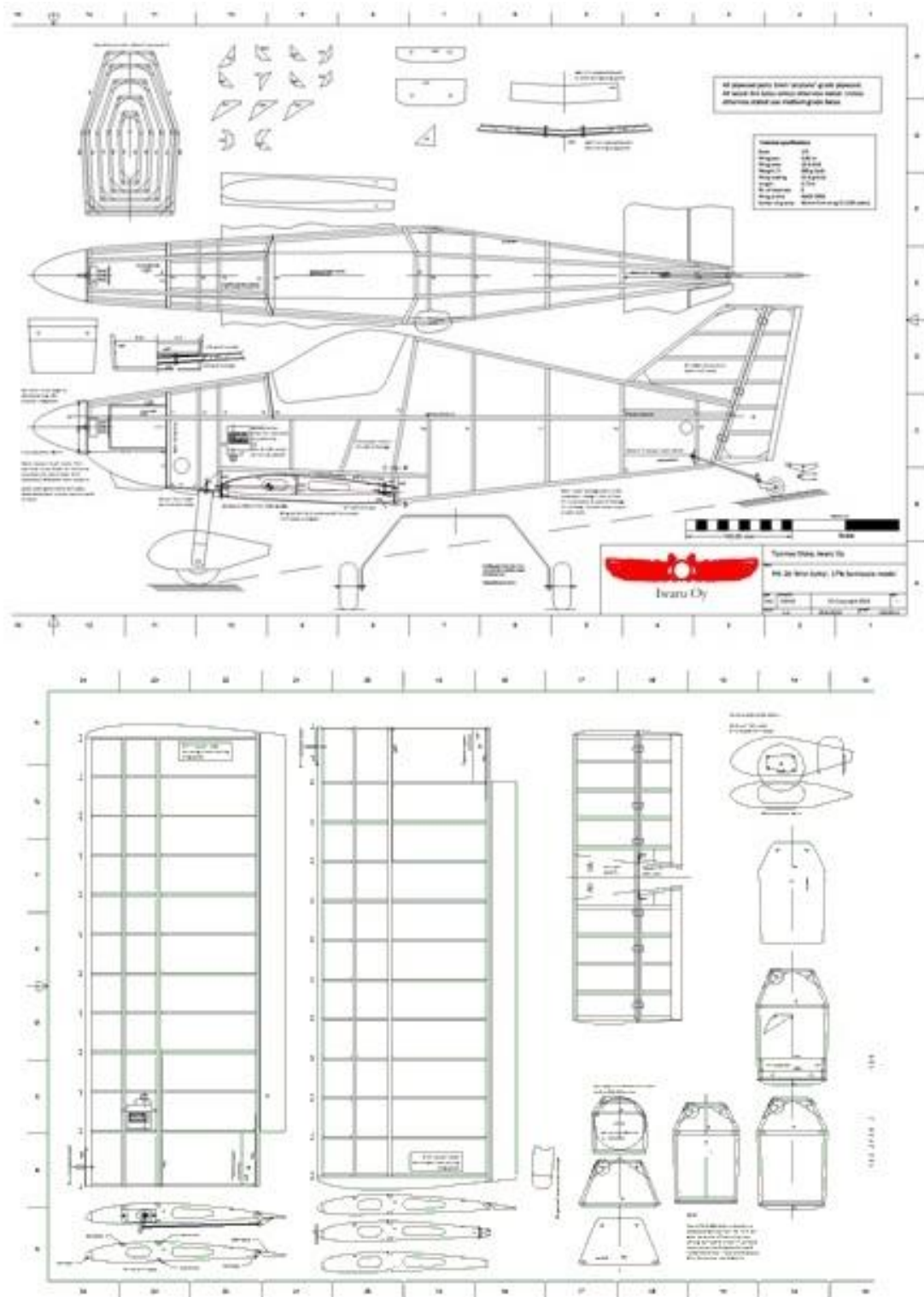
[http://www.trafi.fi/filebank/a/1346930376/7ae0e0d727c5b4adc449fdc3d85f1410/10257-tarkastuskasikirja\\_ultra\\_2003.pdf](http://www.trafi.fi/filebank/a/1346930376/7ae0e0d727c5b4adc449fdc3d85f1410/10257-tarkastuskasikirja_ultra_2003.pdf).

Väisänen, J. 2009. Lentokoneen amfibiokellukkeiden kiinnitysrakenteen suunnittelu. Tampereen ammattikorkeakoulu. Lentotekniikka. Opinnäytetyö.

## LIITTEET

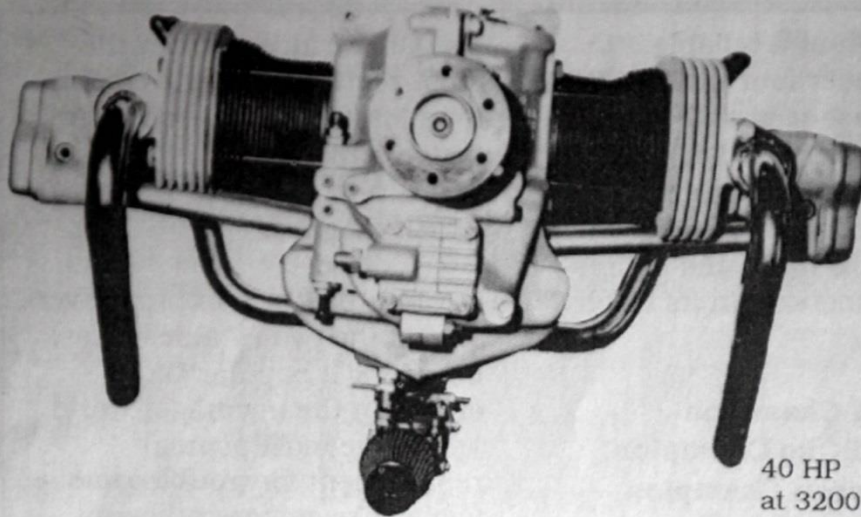
- Liite 1. Minisytyn piirustukset
- Liite 2. Mosler CB-40 moottorin tekniset tiedot

Liite 1. Minisytyn piirustukset



## Liite 2. Mosler CB-40 moottorin tekniset tiedot

## The Mosler CB-40



40 HP  
at 3200 RPM  
90 Pounds

### Our Two-Cylinder Champ!

- ✓ 1083 cc
- ✓ Bore - 94 mm
- ✓ Stroke - 78 mm
- ✓ 40 Horsepower
- ✓ Mosler Counterbalanced Crankshaft
- ✓ Special Cylinder Heads
- ✓ Hydraulic Valve Lifters
- ✓ Full-Flow Oil Filter
- ✓ Oil Cooler
- ✓ Matched Forged Pistons
- ✓ SLICK Magneto Ignition
- ✓ Updraft Carb w/mixture
- ✓ Redesigned Intake Manifold
- ✓ High-Volume Oil Pump
- ✓ Completely Balanced
- ✓ 1000 hours TBO!
- ✓ Sips Just 1.2 to 1.8 GPH!
- ✓ Includes stubby exhaust

### The Little Engine that DID!

Our amazing little **CB-40** is the ultimate in its class, holding a long list of world records. It's proven to be the most reliable **two-cylinder four-stroke** aircraft engine in the world, the *only* one manufactured in the USA.

Engineered for reliability and long life, it's 90 lbs. of velvet dynamite, designed and built from the crankshaft out. We cast our own cases. We use our own special crankshaft to tame the inherent "opposed-twin" vibration to almost nothing. The direct-drive **CB-40** has a float-bowl carburetor with mixture, oil cooler and filter, and Slick magneto.